



UNIVERSIDADE DO VALE DO TAQUARI - UNIVATES  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

**ANÁLISE DA EFETIVIDADE DE MÉTODOS DE REFORÇO POR  
ENCAMISAMENTO EM PILARES CURTOS DE CONCRETO**

Alfredo Henrique Giovanaz

Lajeado, dezembro de 2018

Alfredo Henrique Giovanaz

## **ANÁLISE DA EFETIVIDADE DE MÉTODOS DE REFORÇO POR ENCAMISAMENTO EM PILARES CURTOS DE CONCRETO**

Trabalho apresentado na disciplina de Trabalho de conclusão de curso – Etapa II, do Curso de Engenharia Civil, da Universidade do Vale do Taquari UNIVATES, como parte da exigência para a aprovação na Disciplina.

Orientador: Prof. Me. Rafael Mascolo

Lajeado, dezembro de 2018.

Alfredo Henrique Giovanaz

## **ANÁLISE DA EFETIVIDADE DE MÉTODOS DE REFORÇO POR ENCAMISAMENTO EM PILARES CURTOS DE CONCRETO**

A banca examinadora abaixo aprova a Monografia apresentada na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso - Etapa II, do Curso de Engenharia Civil, da Universidade do Vale do Taquari UNIVATES, como parte da exigência para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Prof.Ms. Rebeca Jéssica Schmitz, UNIVATES.  
Mestre pela UFRGS, Porto Alegre, Brasil.

Prof.Ms. Marcelo Freitas Ferreira, UNIVATES.  
Mestre pela PUC, Porto Alegre, Brasil.

Orientador:

Prof.Ms. Rafael Mascolo, UNIVATES.  
Mestre pela UFRGS, Porto Alegre, Brasil.

Lajeado, dezembro de 2018.

## RESUMO

Embora o concreto seja um material resistente, e tenha seu uso já consolidado no mundo todo, possui algumas dificuldades de ajustes, em relação às mudanças arquitetônicas, ou a erros de projeto e execução. Procurando verificar a efetividade de métodos de reforço, o objetivo geral deste trabalho consiste na elaboração um programa experimental utilizando dois métodos para reforçar pilares curtos, submetidos a ensaios de compressão. Foram produzidos 10 pilares cilíndricos, com 15 cm de diâmetro e 50 cm de altura, com concreto de classe de resistência tipo C35, reforçados por encamisamento, utilizando mantas de fibra de carbono e argamassa com adição de sílica ativa. Quanto à aplicação da fibra, foi variado nos ensaios o número de camadas para aplicação do reforço, utilizando até 3 camadas para verificação da eficiência, obtendo acréscimos de 62,6%, 146,6% e 223,8% na capacidade de carga, para respectivamente uma, duas e três camadas. Paralelo a essa técnica, aplicou-se um reforço em pilares utilizando argamassa com adição de sílica ativa, com espessura de 2,5 cm, obtendo acréscimos de 112% na capacidade de carga e com menor preço de aplicação. Concluiu-se que os métodos de reforço utilizados fornecem elevados acréscimos na resistência à compressão dos pilares ensaiados.

**Palavras chave:** Pilares de Concreto. Reforço Estrutural. Confinamento. PRF. Argamassa de Reforço.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Exemplo de aplicação de reforço metálico .....	20
Figura 02 – Reforço de pilar por aumento de seção e taxa de armadura .....	21
Figura 03 – Exemplos de aplicação do aumento de seção .....	22
Figura 04 – Representação do sistema PRF.....	24
Figura 05 – Pilares reforçados com PRFC .....	26
Figura 06 – Pilar de seção circular submetido à compressão axial.....	30
Figura 07 - Esquema de pilar envolto com PRF .....	32
Figura 08 - Saturação via úmida da fibra de carbono em bancada .....	36
Figura 09 - Saturação via seca, diretamente na superfície do concreto.....	37
Figura 10 – Fluxograma de representação das etapas .....	43
Figura 11 – Materiais utilizados para execução do reforço .....	48
Figura 12 – Processo de Concretagem.....	51
Figura 13 – Pilares em cura úmida.....	52
Figura 14 – Pilares apicoados manualmente .....	54
Figura 15 – Pilares reforçados e corpos de prova.....	55
Figura 16 – Pilares reforçados com argamassa .....	55
Figura 17 – Pilares com <i>primer</i> aplicado .....	56
Figura 18 – Aplicação da manta de fibra de carbono .....	57
Figura 19 – Pilares reforçados com três camadas de PRFC .....	58
Figura 20 – Ensaio mecânicos .....	59
Figura 21 – Rompimento dos pilares do grupo B .....	66
Figura 22 – Ruptura dos pilares do grupo C .....	67

Figura 23 – Ruptura dos pilares do grupo D .....	68
Figura 24 – Rompimento de pilar do grupo E .....	69

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 01 – Gráfico Tensão vs. Deformação das fibras e aço .....	26
Gráfico 02 – Gráfico da curva granulométrica da areia .....	45
Gráfico 03 – Gráfico da curva Granulométrica da brita .....	46
Gráfico 04 – Gráfico da curva de dosagem .....	49
Gráfico 05 – Gráfico do acompanhamento das resistências à compressão do concreto e argamassa .....	70
Gráfico 06 – Gráfico da análise das variações nas capacidades de carga .....	72
Gráfico 07 – Gráfico dos acréscimos de cada sistema de reforço .....	73

## LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Aumento da capacidade de carga após encamisamento para diferentes taxas de armadura .....	31
Tabela 02 – Características do tecido de fibra de carbono .....	47
Tabela 03 – Resultados dos ensaios testes .....	53
Tabela 04 – Resultados dos pilares testemunhos .....	65
Tabela 05 – Resultados dos pilares do grupo B .....	66
Tabela 06 – Resultados do grupo C .....	67
Tabela 07 – Resultados dos pilares do grupo D .....	68
Tabela 08 – Resultado dos pilares do grupo E .....	69
Tabela 09 – Resultados dos corpos de prova .....	71
Tabela 10 – Valores gastos para aplicação dos reforços .....	74
Tabela 11 – Comparação de custos entre métodos .....	75



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT -	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI –	Instituto americano de concreto
CPs-	Corpos de prova
$f_c$ –	Resistência do concreto à compressão
$f_{ck}$ -	Resistência característica do concreto à compressão
$f_{cm}$ –	Resistência média do concreto à compressão
FRP –	<i>Fibre reinforced polymers</i>
GPa -	Gigapascal
kN –	Kilonewton
LATEC –	Laboratório de tecnologia da construção
MPa -	Mega Pascal
N -	Newton
NBR -	Norma Brasileira
PRF -	Polímero reforçado com fibras
PRFC –	Polímero reforçado com fibras de carbono
UNIVATES -	Universidade do Vale do Taquari

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
<b>1.1 Objetivos .....</b>	<b>15</b>
<b>1.1.1 Geral .....</b>	<b>15</b>
<b>1.1.2 Específicos .....</b>	<b>15</b>
<b>1.2 Delimitação do tema .....</b>	<b>15</b>
<b>1.3 Justificativa.....</b>	<b>16</b>
<b>1.4 Estrutura do trabalho .....</b>	<b>16</b>
<b>2 REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>18</b>
<b>2.1 Reforço de estruturas de concreto armado .....</b>	<b>18</b>
<b>2.1.1 Reforço com chapas e perfis metálicos .....</b>	<b>19</b>
<b>2.1.2 Reforço com utilização de material cimentício.....</b>	<b>20</b>
<b>2.1.3 Reforço com utilização de materiais compósitos reforçados com fibras.....</b>	<b>23</b>
<b>2.2 Pilares curtos.....</b>	<b>27</b>
<b>2.2.1 Efeito de Poisson .....</b>	<b>28</b>
<b>2.2.2 Módulo de Elasticidade.....</b>	<b>29</b>
<b>2.2.3 Resistência à compressão .....</b>	<b>29</b>
<b>2.3 Encamisamento de pilares curtos .....</b>	<b>30</b>
<b>2.3.1 Encamisamento de seções com PRF .....</b>	<b>32</b>
<b>2.3.1.1 Modelo teórico de estimativa da carga de ruptura .....</b>	<b>33</b>
<b>2.3.1.2 Seções circulares .....</b>	<b>33</b>
<b>2.3.1.3 Procedimentos de aplicação do sistema PRFC.....</b>	<b>35</b>

2.3.2 Aumento de seção com argamassa	38
2.3.2.1 Modelo teórico de estimativa da carga de ruptura	38
2.3.2.2 Procedimentos de aplicação da argamassa com sílica ativa	39
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>41</b>
3.1 Programa experimental	41
3.2 Materiais	43
3.2.1 Cimento Portland	43
3.2.2 Agregados	44
3.2.2.1 Agregado Miúdo	44
3.2.2.2 Agregado graúdo	45
3.2.3 Água de amassamento	46
3.2.4 Sílica Ativa	46
3.2.5 Aditivos	46
3.2.6 Formas	47
3.2.7 Fibra de Carbono	47
3.2.8 Resina Epóxi	48
3.3 Processos e dosagem	48
3.3.1 Determinação e execução do traço do concreto dos pilares	48
3.3.2 Aplicação dos sistemas de reforço	52
3.3.2.1 Reforço com argamassa com sílica ativa	53
3.3.2.2 Reforço com PRFC	56
3.4 Ensaios mecânicos	58
3.5 Cálculo da carga de ruptura estimada	60
3.5.1 Pilares reforçados com PRFC	60
3.5.2 Pilares reforçados de argamassa com adição de sílica ativa	63
<b>4 RESULTADOS</b>	<b>65</b>
4.1 Resultados do grupo A	65
4.2 Resultados do grupo B	66
4.3 Resultados do grupo C	67
4.4 Resultados do grupo D	68
4.5 Resultados do grupo E	69
4.6 Resultados dos corpos de prova	70

<b>4.7 Comparação entre resultados teóricos e resultados experimentais .....</b>	<b>71</b>
<b>4.8 Análise geral dos acréscimos de resistência .....</b>	<b>72</b>
<b>4.9 Análise dos custos de cada método .....</b>	<b>73</b>
<b>5 CONCLUSÃO .....</b>	<b>77</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>79</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O material de construção mais utilizado no mundo é o concreto, e normalmente é composto pela mistura de cimento Portland com agregados (areia, brita) e água, assim descreveram Allen e Iano (2013). O principal motivo pelo apreço de engenheiros e profissionais da construção civil com o concreto, segundo Mehta e Monteiro (2014), é a sua resistência à água sem grave deterioração, a sua facilidade em moldar formas de elementos estruturais e o seu baixo custo.

Estruturas de concreto necessitam menor manutenção quando comparadas à madeira ou aço, não necessitam tratamento superficial, e sua resistência aumenta com o tempo. O aço, por exemplo, sofre corrosão, necessita tratamento superficial, dentre outros métodos de proteção para que tenha uma maior vida útil (SOUZA; RIPPER, 1998).

Conforme Araújo (2010), a principal característica do concreto é a sua alta resistência à compressão, e a baixa resistência à tração, sendo um material frágil, suscetível a fissuras. O concreto armado é a união do concreto convencional com uma armadura, normalmente composta por barras de aço, que possuem alta resistência à tração, fazendo com que a mistura final suporte tanto compressão, por parte do concreto, quanto à tração, pelo aço. Segundo Juvandes (1999), embora seja um material que é facilmente moldado, possui algumas dificuldades de reajuste, principalmente em mudanças arquitetônicas com a estrutura já pronta.

As estruturas de concreto armado têm uma vida útil relativamente longa, no entanto, seu período de utilização pode reduzir devido a alguns fatores, como

aumento do nível de solicitações ou alterações do seu uso (BEBER, 2003). Desde o início do uso do cimento como aglomerante, e ao longo de sua história, sempre foram buscadas formas para aperfeiçoar o desempenho do concreto. Bernardi (2003) comenta que a partir da década de 1960, a adição de fibras ao concreto abriu um leque maior de possibilidades para o reforço de estruturas

Beber (2003) aponta que desde o início do século XXI inúmeros centros de pesquisa pelo mundo estão se esforçando para buscar novas opções para o reforço de estruturas de concreto armado, a fim de estender o seu período de atuação. Uma técnica que se destaca é a utilização de materiais compósitos, principalmente os compósitos com fibras sintéticas. Dentre elas se sobressaem a aramida, o carbono e o vidro. Suas principais vantagens são a alta resistência à tração e a resistência à corrosão.

O termo “materiais compósitos” é definido como um sistema de materiais, e é formado por dois ou mais elementos, sendo dois deles a matriz e o elemento de reforço. O sistema de Polímeros Reforçados com Fibras (PRF), ou *fibre reinforced polymers (FRP)*, é um sistema que tem sido usado para revigorar e renovar estruturas de concreto no mundo todo desde 1980, além de ser muito comum seu uso para fabricação de elementos automobilísticos, aeroespaciais e aeronáuticos. Na construção civil, esse método consiste na colagem externa de malhas de polímeros reforçados com fibras, sendo a de carbono, a fibra com maior resistência mecânica quando aplicada em peças de concreto. Esse composto foi desenvolvido como uma alternativa aos métodos tradicionais de reforço exteriores, e seus estudos iniciais foram elaborados tanto no Japão quanto na Europa, na década de 1980, e atualmente no Brasil utiliza-se como base os manuais e normas do *American Concrete Institute (ACI)*, ou Instituto Americano de Concreto (ACI, 2008).

Loturco (2017) comenta que o compósito de fibras de carbono imersas em uma matriz polimérica, normalmente uma cola epóxi, pode apresentar uma resistência à tração 4 vezes superior ao aço. Schwarz (1984, apud Beber, 2003) afirma que as fibras de carbono são identificadas pela associação da sua alta resistência, baixo peso, elevada rigidez e um considerável módulo de elasticidade. Sua principal vantagem, em relação aos outros sistemas de recuperação de estruturas, é ocupar áreas reduzidas, pois normalmente são utilizadas mantas de

aproximadamente 0,1 milímetros de espessura para aplicação em peças de concreto.

Ainda segundo Loturco (2017), a utilização como reforço estrutural pode vir a ser importante em alguma mudança de projeto para determinados ambientes. Com um possível aumento de cargas, a estrutura original pode não comportar as novas exigências, logo, a utilização de uma fibra polimérica resolveria esse problema, visto que aumentaria a capacidade da estrutura. Outra aplicação usual desse tipo de reforço é em aberturas executadas em estruturas de concreto (vigas, pilares e lajes), para passagem de tubulações, escadas ou até mesmo abertura de portas em locais críticos.

Paralelo a esse método, o reforço de elementos estruturais por aumento da seção com concreto, ou argamassas de alta resistência, é muito utilizado, principalmente pela facilidade de execução, e baixo custo. Reis ( 2001) destaca que para um bom resultado do reforço é imprescindível uma boa aderência entre o concreto velho e o concreto novo, para que ocorra a transferência de tensões entre eles. Para fins de projeto, itens como resistência e módulo de elasticidade do concreto velho devem ser analisados.

Dentre as técnicas de reforço de pilares, é possível observar algumas vantagens nas técnicas que possuem o efeito de confinamento do concreto. É possível ter um significativo aumento da resistência com pequenos aumentos nas dimensões das peças. O propósito do confinamento resulta das pressões laterais existentes no eixo longitudinal do pilar, aumentando a capacidade resistente e ductilidade. Na sua forma passiva, pode ser feito com uso de argamassa, chapas de aço, e camisas de compósitos coladas (CARRAZEDO, 2002).

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Geral**

Este trabalho tem como objetivo geral realizar uma avaliação da efetividade de dois métodos de reforço estrutural em pilares curtos de seção circular, quanto aos acréscimos de cada método na capacidade de carga dos elementos de concreto.

### **1.1.2 Específicos**

Os objetivos específicos do trabalho são:

- Analise das técnicas de reforço quanto ao aumento de carga teórica e real, a partir da análise do comportamento mecânico;
- Avaliar a relação entre a capacidade de carga do reforço e seu custo;
- Elaborar um estudo prático do comportamento de pilares curtos de concreto reforçados com Polímeros Reforçados com Fibra de Carbono (PRFC) e com aumento de seção utilizando argamassa com adição de sílica ativa.

## **1.2 Delimitação do tema**

O tema é delimitado no estudo de dois métodos de reforço para pilares curtos de concreto simples de seção circular, um com aumento de seção e uso de material cimentício e outro sem aumento de seção utilizando colagem de fibras. O estudo aborda somente uma classe de resistência de concreto, com um formato de seção, e restringe a avaliação quanto às propriedades mecânicas e ao custo dos materiais.



### **1.3 Justificativa**

Embora o concreto seja um material duradouro, e utilizado em larga escala no mundo, em algum momento da sua vida útil pode haver a necessidade de reabilitação. Seja por alterações arquitetônicas, deterioração da sua estrutura ou ainda falha na execução. Esse acréscimo na capacidade de resistência pode ser realizado de diferentes formas, como por exemplo, reforço com fibras externas ou aumento de seção com material cimentício. Assim, o presente trabalho busca estudar e avaliar dois métodos para reforço e recuperação de estruturas por encamisamento do concreto existente. Um deles, a utilização de PRF, é um assunto relativamente novo no mercado, porém em expansão no Brasil e no mundo, com inúmeras pesquisas sendo desenvolvidas sobre a sua utilização, visando melhorias no aproveitamento desse material, tanto na parte de cálculos, quanto na aplicação e racionalização do material, o que justifica a escolha desse tema, como forma de aprimorar e verificar a efetividade dos métodos de reforço quanto aos acréscimos na capacidade de carga, quanto aos métodos de cálculo e seu custo.

Concomitante ao uso do PRF será analisado um modo de reforço já incorporado no setor da construção, utilizando o aumento de seção com aplicação de uma argamassa com adição de sílica ativa, também visando a efetividade dos acréscimos na capacidade de carga, dos cálculos e dos custos.

### **1.4 Estrutura do trabalho**

O trabalho está estruturado em cinco capítulos.

O primeiro capítulo consiste em uma apresentação introdutória ao contexto do concreto armado e seus problemas ao longo do tempo, além dos métodos de reforços de estruturas em concreto mais utilizados na construção civil. Integra também os objetivos, geral e específicos, justificativa e estrutura do trabalho.

O segundo capítulo mostra a revisão de literatura sobre métodos de reforço em estruturas de concreto e as aplicações em pilares curtos, além das referências que fundamentam o desenvolvimento e a construção do trabalho.

O terceiro capítulo mostra a metodologia a ser empregada na realização deste trabalho, mostra a abordagem do problema, procedimentos técnicos e planejamento de estudo.

O quarto capítulo exhibe a análise dos resultados e discussões sobre os métodos de reforço utilizados, seus rendimentos quando submetidos a ensaios mecânicos de compressão, e sua fidelidade aos cálculos das estimativas de capacidade de carga.

O quinto capítulo apresenta a conclusão do trabalho, apresentando os principais pontos de observação, e uma análise técnica dos resultados.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

Neste capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica com abordagem dos conteúdos que fundamentam o tema escolhido para o trabalho, focando os assuntos previamente apresentados na introdução, visando estabelecer uma relação entre o concreto e os reforços para seus elementos, utilizando um compósito polimérico de fibra de carbono e o método de aumento da seção transversal da estrutura.

### **2.1 Reforço de estruturas de concreto armado**

Conforme Souza e Ripper (1998), os motivos em que são necessários reforços em elementos estruturais podem ser a regeneração da capacidade portante, diminuída por algum acidente (choques, incêndios, etc.), desgaste/deterioração, ou também modificação estrutural por necessidade arquitetônica. Helene (2005) complementa que em estruturas de concreto armado podemos nos deparar com erros de cálculo no projeto estrutural, ou em alguns casos, com novas solicitações que superem a carga original de projeto. Deve-se então adotar algum sistema de reforço adequado para que essas estruturas suportem as novas cargas. Os reforços mais utilizados são com concreto, argamassa ou com perfis metálicos. Como último recurso, deve-se fazer a substituição funcional da estrutura, eliminando o elemento defasado das ações mecânicas com a colocação de um novo. Além disso, podem-se utilizar revestimentos com sistemas de PRF, que são materiais compósitos de fibras inorgânicas em matriz de resinas orgânicas.

No Brasil, os meios de reforços estruturais mais utilizados são o método de aumento da seção dos pilares, com a inserção de um novo concreto no exterior da peça, e o confinamento por meio de chapas ou pilares metálicos (RIGAZZO, 2003). Conforme Schuler (1998), essas técnicas são utilizadas com o objetivo de restituir ou incrementar a durabilidade, as resistências, a função e a aparência de estruturas de concreto que têm sua durabilidade reduzida dentro do período de sua vida útil. Para fazer a seleção dos materiais a se utilizar no reforço, devem-se levar em consideração certos parâmetros, como preço, disponibilidade, necessidade de equipamentos para aplicação e mão de obra.

O reforço de uma estrutura pelo aumento de sua seção, acrescentando concreto, normalmente é utilizado em casos de deficiência de resistência a compressão da peça, e/ou pela baixa qualidade do concreto. Esse incremento aumentaria o braço de alavanca e, como consequência, a capacidade do elemento estrutural. Ao se aplicar esse método, pode haver a necessidade do aumento do número de barras existentes, no entanto, esse método é de difícil execução (SOUZA; RIPPER, 1998).

Além disso, os reforços com concreto armado podem ser executados empregando suportes novos, como por exemplo, a inserção de um pilar em um vão (pórtico) fissurado, reduzindo os esforços na área degradada (HELENE, 2005). Além desse método, reforçando a ideia de Rigazzo (2003), uma estrutura pode ser reforçada por colagem ou chumbamento de chapas metálicas, ou colocação de um perfil metálico.

### **2.1.1 Reforço com chapas e perfis metálicos**

Para adicionar capacidade resistente, de forma rápida e eficiente, a utilização do reforço por colagem ou chumbamento de chapas metálicas, ou chumbamento de perfis metálicos é a melhor opção, principalmente em casos de emergência. Em pilares, o aumento da resistência e ductilidade se dá pelo confinamento produzido pelos elementos de reforço (SOUZA; RIPPER, 1998).

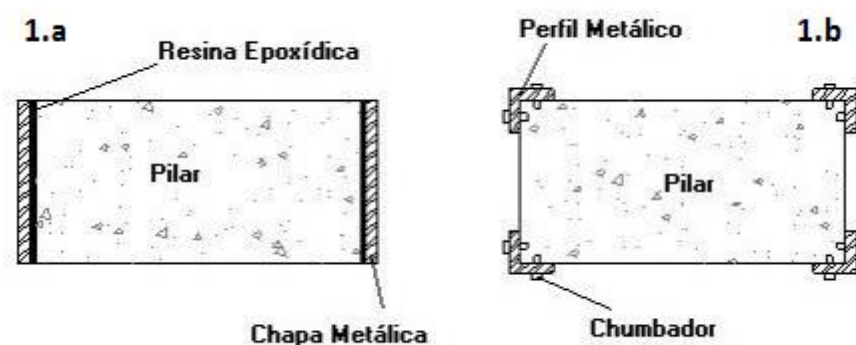
Garcez (2007) escreveu que o método de colagem de chapas metálicas tem sido utilizado para aumentar a resistência à tração da peça, além de ter baixo peso de material, e menor custo. O autor afirma ainda que essa técnica é indicada para estruturas pequenas, e em locais onde não possa sofrer corrosão, como ambientes internos ou protegidos.

Conforme Souza e Ripper (1998), os principais parâmetros a se seguir em um reforço de colagem de chapas metálicas são os seguintes:

- A espessura máxima da cola não pode ultrapassar 1,5 mm;
- Espessura das chapas não pode exceder 3 mm, a não ser que tenha alguma ancoragem especial, tal como buchas metálicas expansivas.

A colagem ou chumbamento de chapas/perfis metálicos consiste em amarrar a estrutura através dessas placas. A Figura 01 mostra um exemplo de colagem de chapas utilizando resina epóxi. Em alguns casos, para evitar o descolamento, as chapas são parafusadas ao concreto. A Figura 01 também apresenta a inserção de perfis metálicos nas extremidades da peça, fixados através de chumbadores.

Figura 01 – Exemplo de aplicação de reforço metálico



Fonte: Rigazzo (2003, p. 6).

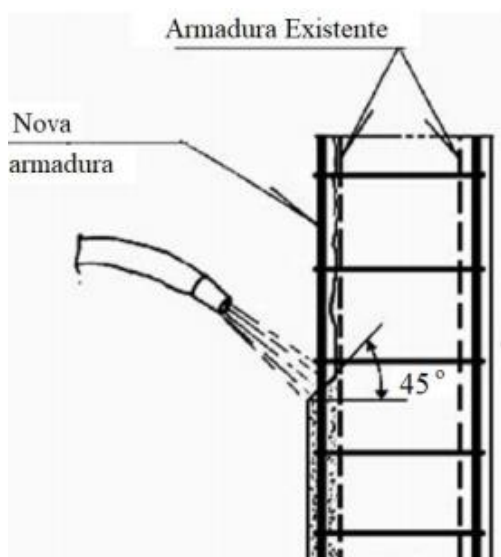
### 2.1.2 Reforço com utilização de material cimentício

Conforme Takeuti (1999) o reforço de pilares pode ser realizado a partir do aumento da seção transversal utilizando algum material cimentício com resistência elevada. É um sistema muito utilizado, principalmente pelo lado econômico e rapidez

de execução. Em contrapartida, o resultado final do reforço deixa os elementos da estrutura com dimensões maiores do que as originais, além de necessitar um tempo de espera maior para que o reforço atinja a idade e a resistência adequada, retardando a liberação das ações atuantes.

Para uma melhor aplicação da técnica, uma opção é fazer o descarregamento do pilar, para melhor solidez e maior aderência do conjunto. No entanto, em alguns casos, como em prédios muito altos, não é viável, pelas altas cargas que o pilar está sujeito (SOUZA; RIPPER, 1998). A Figura 02 mostra um esquema da técnica de aumento de seção e da taxa de armadura.

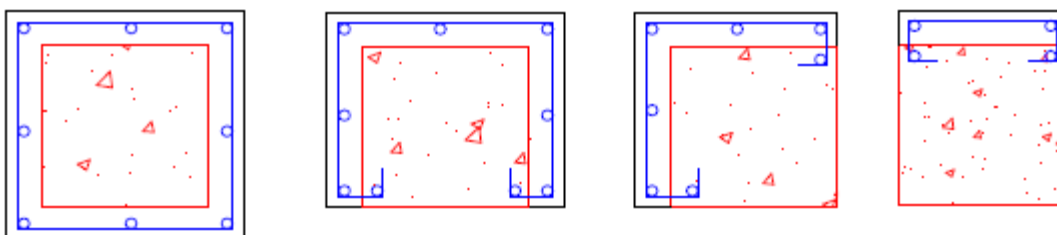
Figura 02 – Reforço de pilar por aumento de seção e taxa de armadura



Fonte: Souza e Ripper (1998)

Takeuti (1999) ainda afirma que o reforço de pilares deve ter o aumento das suas dimensões com um concreto de resistência adequada. A execução desse acréscimo de seção não é obrigatória em torno de todo o pilar, podendo ser executado em apenas algumas frentes (FIGURA 03), dependendo da localização da estrutura, das condições de acesso, e das cargas a serem suportadas.

Figura 03 – Exemplos de aplicação do aumento de seção



Fonte: Takeuti (1999, p.13)

Sousa (2008) comenta que o material utilizado para reforço deve ser de boa qualidade e apresentar determinadas propriedades, para ser compatível com o concreto já existente, tais como boa resistência mecânica à compressão, boa aderência, baixa retração, elevada trabalhabilidade e um módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson equivalente ao do concreto existente. O autor coloca ainda que é recomendável o uso de um concreto compacto, com baixa porosidade e com agregados pequenos.

Seguindo a ideia de Schuler (1998), os concretos e argamassas de cimento Portland são os mais utilizados para esse tipo de reparo. Seu uso é considerável principalmente por apresentar características similares à estrutura a ser reparada, ou por poderem ser dosadas para tal finalidade. Além disso, podem-se melhorar as propriedades com uso de adições minerais, como a sílica ativa.

Sensale (2000) afirma que a sílica ativa é um subproduto das indústrias de ferro, que se for eliminado de forma errada pode acarretar em danos ambientais. Em alguns casos, esse material pode ser processado, ou utilizado como adição no concreto. Schuler (1998) complementa que seu uso é interessante, pois seus grãos são cerca de 100 vezes menores que o do cimento, proporcionando um concreto com menor permeabilidade, e conseqüentemente mais protegido dos agentes externos, além de obter uma maior resistência mecânica.

Vaske (2005) comenta que o uso de sílica ativa em concretos e argamassas é relacionado a suas propriedades físicas e químicas. Quanto à parte física, o efeito positivo do seu uso se dá pela forma esférica de suas partículas e extrema finura, preenchendo os vazios originados na hidratação, o que promove uma maior

densidade do concreto ou da argamassa. A parte química se dá pelo alto nível de atividade pozolânica da sílica no estado amorfo e com o elevado índice de reação com o hidróxido de cálcio que é gerado após a reação/hidratação do cimento Portland. Esse composto reage com a sílica, formando silicato de cálcio hidratado, que é o principal encarregado dessa resistência formada. O autor ainda escreve que o acréscimo de sílica ativa na mistura é muito importante em argamassas utilizadas para reforço e reparos de estruturas de concreto, principalmente em estruturas onde se busca alta resistência mecânica, e baixa porosidade.

### **2.1.3 Reforço com utilização de materiais compósitos reforçados com fibras**

Os materiais compósitos são resultado de uma combinação de no mínimo dois materiais. Um deve apresentar elevada resistência, alto módulo de elasticidade, e ter pequenos filamentos, normalmente fibras, e a outra fase, a matriz, deve ser macia e dúctil, envolvendo a primeira fase para transferência completa das tensões entre as fibras e o plano (JUVANDES, 1999).

Uma das técnicas já apresentadas neste trabalho, a colagem de chapas metálicas, ou a instalação de perfis metálicos, tem como revés a possibilidade de apresentar corrosão na área de interação entre metal e o adesivo depois de algum tempo, o que acaba prejudicando a aderência do reforço. Segundo Santos (2008), a principal vantagem dos polímeros reforçados com fibras (PRF), ou *fibre reinforced polymers (FRP)*, que é uma técnica que vem sendo utilizada desde os anos 90, é a eliminação da corrosão, além de seu baixo peso, alta resistência, durabilidade, e facilidade de aplicação, o que reduz o tempo de mão de obra. Conforme Reis (2001) outra vantagem do sistema PRF é seu antimagnetismo, o que o credencia a ser utilizado em alguns ambientes especiais, tais como hospitais.

Os sistemas de PRF podem ser utilizados para reabilitar e restaurar a força de um elemento estrutural em diversos casos. Por deterioração, questões de modernização, aumento de cargas devido a alterações de projeto, ou por erros construtivos (ACI 440, 2008, p. 6).

Para execução de um reforço com o sistema PRF, deve haver uma avaliação minuciosa, por um profissional habilitado da estrutura, da capacidade de carga, das deficiências e suas causas, e dos projetos (ACI, 2008).

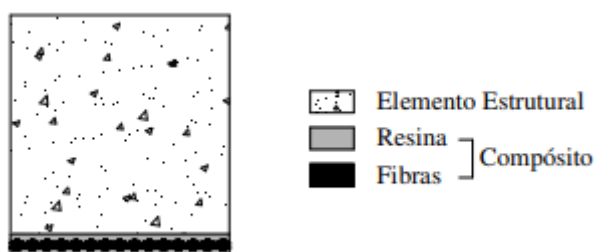


A utilização de compósitos de matriz polimérica pode ser feita de maneiras distintas na engenharia civil (FONSECA, 2012). Pode ser utilizada como material de construção em estruturas novas, com a utilização de fibras picadas em tamanhos pequenos, ou na forma de tecidos, como reforço de estruturas de concreto armado a fim de reparar, reforçar ou proteger da ação de abalos sísmicos ou forças extras. A reparação é a recuperação da resistência de uma estrutura comprometida, onde há um componente estrutural danificado. O reforço está relacionado a um melhor desempenho da estrutura, podendo corrigir as patologias existentes devido às deficiências de projeto ou falta de manutenção. Fonseca (2012) afirma ainda que ao se utilizar a fibra como reforço, há um aumento de ductilidade e da resistência ao corte dos elementos, resistindo melhor aos impactos de abalos sísmicos.

Um dos maiores desafios para a indústria da construção civil e para a sociedade em geral no início deste século prende-se com os custos de manutenção das estruturas e infraestruturas, geralmente ligados a fenômenos de corrosão em estruturas de aço e de concreto armado. Neste contexto, a utilização de materiais poliméricos reforçados com fibra (PRF), já amplamente utilizados em outros ramos da engenharia (Aeronáutica, Naval, Automóvel, etc.), tem sido sugerida devido às excelentes propriedades mecânicas (resistência), físicas (leveza) e de durabilidade (resistência à corrosão) (CORREIA; GONILHA; NUNES, 2014, p.1).

Segundo Santos (2008), os materiais que compõem o sistema PRF são homogêneos, anisotrópicos, e de comportamento perfeitamente elástico até a sua ruptura. Conforme a Figura 04, o sistema é composto pelas fibras (elementos de reforço) e a matriz, a resina epóxi, que é a responsável pela ligação entre os materiais.

Figura 04 – Representação do sistema PRF



Fonte: Santos (2008)

Juvandes (1999) comenta que a matriz (resina polimérica) tem como papel fazer a transferência de tensões entre estrutura existente e a fibra, e, além disso,

proteger das intempéries, e dos possíveis danos à sua resistência. Suas características alteram a resistência ao corte do PRF, e servem também como sustentação contra a instabilidade das fibras quando sujeitas à compressão. Visto isso, a escolha do material usado como matriz deve ser prudente, e seguindo esses critérios, geralmente são utilizadas resinas do tipo epóxi endurecidas.

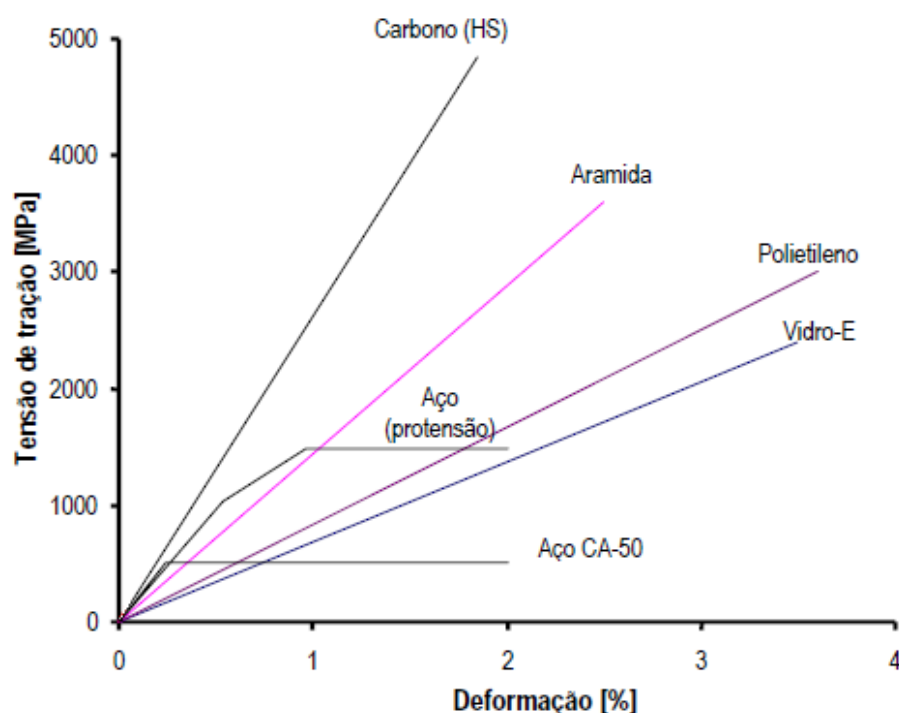
Garcez (2007) aponta que o principal fator que ainda limita o uso de PRF na construção civil é seu alto preço de aplicação quando comparado aos sistemas mais tradicionais, sendo vantajosa sua utilização onde poderia trazer benefícios que esses outros métodos não trariam. Em um reforço estrutural, aproximadamente 20% dos custos estão relacionados a material, e o restante à mão de obra, o que com o uso de PRF seria diminuído. Garcez (2007) ainda comenta que as fibras mais utilizadas para reforçar polímeros visando o reforço de estruturas são as de carbono, aramida e vidro.

Conforme Hamann (2017), as fibras de carbono são compostas principalmente pelo polímero poliadrlonitrila (PAN) – obtido de uma variação do acrílico, e fibras de rayon. Essa matéria prima tem uma alta taxa de carbono (mais de 90%) na sua composição atômica.

O processo de produção forma-se com a oxidação dessas fibras, e o seu processamento a temperaturas na casa 1500° Celsius. Durante esse procedimento térmico, o polímero é alongado, de modo a ficar paralelo ao eixo das fibras, resultando em uma ligação rígida e muito resistente às ações mecânicas (MACHADO, 2012). Segundo Silva (2006) os Polímeros Reforçados com Fibras de Carbono (PRFC) tiveram sua expansão tecnológica no Japão, após a cidade de Kobe ser atingida por um terremoto na metade da década de 90.

O gráfico 01 apresenta a tensão vs. deformação das fibras poliméricas mais utilizadas para reforçar estruturas. É possível analisar a maior capacidade desses materiais comparados ao aço, principalmente a fibra de carbono que possui maior capacidade de absorver as solicitações mecânicas.

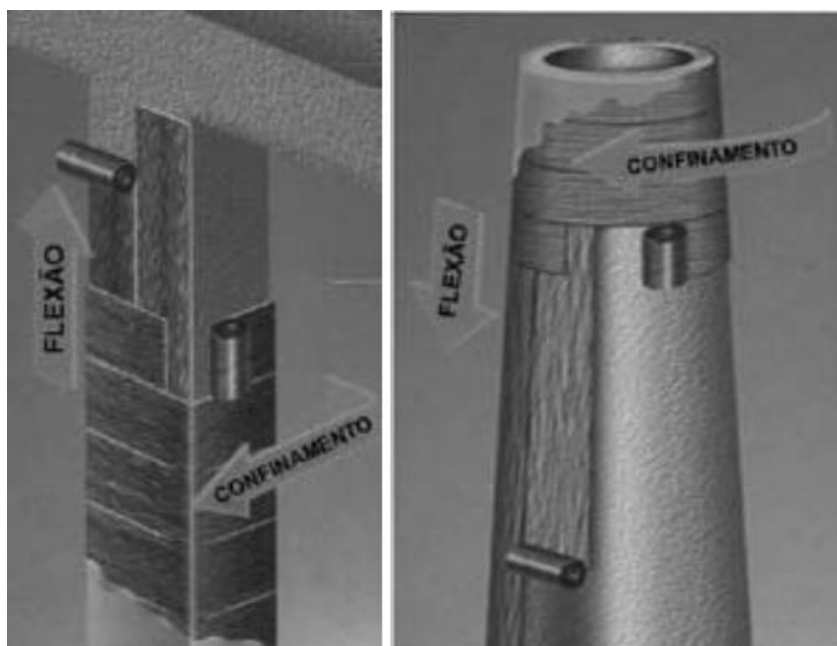
Gráfico 01 – Gráfico Tensão vs. Deformação das fibras e aço



Fonte: Beber (2003, p.27)

Conforme Silva (2006) a maioria dos reforços em PRFC é utilizada em pilares, principalmente para melhorar suas funções em pontes e viadutos. A Figura 05 apresenta algumas aplicações em pilares por confinamento.

Figura 05 – Pilares reforçados com PRFC



Fonte: Machado (2012)

## 2.2 Pilares curtos

Pilares são elementos verticais de eixo reto que tem por finalidade transmitir todas as tensões da edificação para as fundações, além de fornecerem estabilidade global à estrutura. Por essas características, essas peças devem ter uma atenção maior na hora do dimensionamento (SANTOS, 2017).

Os pilares podem ser classificados quanto ao seu índice de esbeltez:

- curtos ( $\lambda \leq 35$ );
- médios esbeltos ( $35 \leq \lambda \leq 90$ );
- esbeltos ( $\lambda > 90$ ).

O item 15.8.2 da NBR 6118 (ABNT, 2014) determina que para ser considerado pilar curto, o elemento estrutural deve atender à condição do índice de esbeltez  $\lambda \leq 35$ , para que sejam ignoradas as forças de segunda ordem. A determinação desse valor é dada pela Equação 1, e em sua forma simplificada na equação 6.

$$\lambda = \frac{l_e}{i_{min}} \leq 35 \quad (1)$$

Onde:

$l_e$  – comprimento de flambagem;

$i_{min}$  – raio mínimo de giração.

O raio mínimo de giração é definido pela equação 2.

$$i_{min} = \sqrt{\frac{I_{min}}{A}} \quad (2)$$

Onde:

$I_{min}$  = momento de inércia mínimo;

$A$  - área da seção.

Para seções quadradas ou retangulares, a determinação de área, momento de inércia mínimo, raio de giração e índice de esbeltez são definidos conforme as equações 3 e 4, sendo  $b$  e  $h$  as dimensões da seção transversal do pilar.

$$A = b \cdot h \quad (3)$$

$$I_{min} = \frac{b \cdot h^3}{12} \quad (4)$$

As equações 3 e 4 podem ser substituídas em (2), para determinação do raio mínimo de giração, e em (1), para determinação do índice de esbeltez.

$$i = \frac{h}{\sqrt{12}} \quad (5)$$

$$\lambda = \frac{l_e \cdot \sqrt{12}}{h} \quad (6)$$

Para seções circulares, Machado (2012) indica a utilização da equação 7 para o cálculo do índice de esbeltez.

$$\lambda = \frac{l_e \cdot 4}{h} \quad (7)$$

Onde:

$l_e$  - comprimento de flambagem;

$h$  - diâmetro do pilar.

### 2.2.1 Efeito de Poisson

O coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) é a razão entre a deformação lateral e a deformação na direção do carregamento. Segundo Hibbeler (2009), um corpo submetido a uma força axial tem seus lados expandidos lateralmente, logo, as dimensões da peça sofrem deformações proporcionais no comprimento, e no diâmetro. Seu valor é único para determinado material, e a equação 8 que define esse coeficiente é expressa a seguir.

$$\nu = - \frac{\epsilon_{lat}}{\epsilon_{long}} \quad (8)$$

Onde:

$\epsilon_{lat}$  – deformação transversal/lateral;

$\epsilon_{Long}$  - deformação longitudinal/axial.

Um material que não demonstrar nenhuma deformação quando alongado ou comprimido terá o coeficiente igual a zero. Mehta e Monteiro (2014) definem que para peças de concreto, o valor do coeficiente de Poisson varia entre 0,15 e 0,20.

### 2.2.2 Módulo de Elasticidade

Módulo de elasticidade é a relação direta entre a deformação instantânea e a tensão aplicada dentro de certo limite adotado. Para o concreto, esse fator é calculado através da curva tensão vs. deformação, após carregamento uniaxial (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Quando não forem realizados ensaios, é possível estimar o valor do módulo de elasticidade ( $E$ ), através da equação 9, da NBR 6118 (ABNT, 2014), que leva em consideração a resistência característica do concreto à compressão ( $f_{ck}$ ).

$$E = 5600 \cdot \sqrt{f_{ck}} \quad (9)$$

### 2.2.3 Resistência à compressão

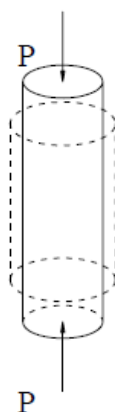
Conforme Takeuti (1999) a resistência à compressão é a característica mais importante do concreto. Através dela podemos ter uma suposição da capacidade portante da estrutura, pois todas as outras características são baseadas no valor da resistência à compressão. Machado (2012) afirma que o concreto, quando comprimido axialmente, tem modificações radiais que acarretam na sua expansão, devido ao efeito de Poisson.

### 2.3 Encamisamento de pilares curtos

Oliveira (2017) comenta que no concreto, quando solicitado por compressão axial, o caminho das tensões internas é feito pelos agregados, criando parcelas de tensões que tendem a separá-los, originando pequenas fissuras na peça. A pasta de cimento colocada ao redor da peça impede que seja feita essa movimentação dos agregados. Quando é colocado um sistema de reforço em uma estrutura, essa resistência lateral eleva-se, impedindo que as partículas internas se separem, formando um confinamento para o concreto. Sendo assim, com o aumento da pressão confinante, é necessária uma força axial maior para chegar à ruptura da peça.

Carrazedo (2002) escreveu em sua dissertação que o confinamento do concreto pode ser aplicado de forma ativa, utilizando um líquido confinante, ou de forma passiva, que pode ser entendido como um pilar envolto por uma parede fina. Com a aplicação da força axial, ocorre um encurtamento na peça, proporcional ao módulo de elasticidade do material e uma expansão radial, proporcional ao coeficiente de Poisson. A Figura 06 apresenta essas características.

Figura 06 – Pilar de seção circular submetido à compressão axial



Fonte: Carrazedo (2002)

Carrazedo (2002) comenta que as características dos materiais confinantes influenciam no desempenho do encamisamento. Há uma grande diferença da pressão lateral exercida pela colagem de aço e por compósitos. O aço, após atingir

o escoamento, mantém uma pressão lateral constante, enquanto os compósitos apresentam uma pressão crescente até sua ruptura.

Diversos estudos já foram realizados sobre reforços de pilares curtos de concreto utilizando confinamento com PRFC ou argamassa. Carrazedo (2002), utilizando reforço com manta de fibra de carbono, analisou a influência da taxa de armadura e do número de camadas em pilares de seção circular com dimensões de 19 x 57 cm, submetidos a ensaios de compressão axial centrada. Após os resultados, o autor observou acréscimos maiores na capacidade resistente de pilares encamisados com menores taxas de armadura ( $\rho_s = 0$ ), isso devido ao fato de que o aumento da resistência com a aplicação do encamisamento é referente ao concreto não confinado, e à pressão lateral exercida pelo sistema de reforço, sendo a armadura um acréscimo majoritário na resistência à tração do concreto inicial não confinado. Os resultados obtidos pelo autor estão apresentados na tabela 01.

Tabela 01 – Aumento da capacidade de carga após encamisamento para diferentes taxas de armadura

Pilares de seção circular		
Taxa de Armadura	n (camadas)	Acréscimo
$\rho_s = 0\%$	1	48,4 %
	2	103,3 %
$\rho_s = 1\%$	1	62,9%
	2	105,0%
$\rho_s = 2\%$	1	31,0%
	2	62,5%

Fonte: Carrazedo (2002). Adaptado pelo autor.

Considerando essas informações, Oliveira (2017) não utilizou nenhuma taxa de armadura em sua tese, visto que sua adição acarretaria em um aumento significativo na resistência dos pilares, excedendo assim a capacidade de carga da prensa do laboratório. Ele ensaiou pilares de seção retangular 12 x 36 cm, com altura de 72 cm, com os cantos das seções arredondados em 1,5 cm, obtendo acréscimos na faixa de 50 a 150%, dependendo da quantidade de reforço.

Utilizando argamassa de adição de sílica ativa como reforço de pilares, Vaske (2005) ensaiou pilares de seção retangular com as arestas arredondadas, com



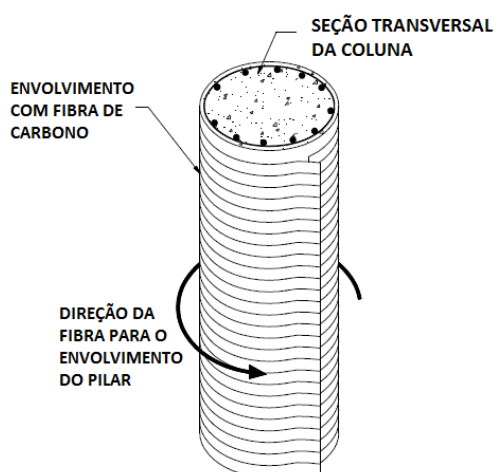
dimensões de 17 cm de lado, e 72 cm de altura. Ao final dos ensaios, o autor obteve um acréscimo médio de 70 % na capacidade de carga dos pilares.

Sudano (2010) apresenta que o encamisamento com PRFC e com argamassa têm o efeito de confinamento diminuído em pilares com seção transversal quadrada ou retangular, tendo em vista a concentração de tensões que surgem nas extremidades. Em pilares circulares cria-se um efeito de membrana, onde as tensões são distribuídas de forma uniforme no concreto. Oliveira (2017) complementa que ao se considerar que é um material de elevado preço e de difícil execução, é recomendada a busca do seu melhor rendimento para análise.

### 2.3.1 Encamisamento de seções com PRF

Santos (2008) comenta que a técnica de encamisamento utilizando materiais compósitos é utilizada principalmente em pilares, e se dá pelo envolvimento da estrutura por meio de “coletes” regulares por toda a peça. Machado (2012) complementa que a resistência à tração das fibras produz uma tensão de confinamento na peça, que resulta em um aumento na capacidade da estrutura, e na deformação máxima de compressão. Esse efeito de confinamento é alcançado devido à orientação das fibras, transversais ao eixo longitudinal da peça. Esse fato provoca um efeito similar à ação dos estribos. A Figura 07 expõe o confinamento de uma peça de seção circular.

Figura 07 - Esquema de pilar envolto com PRF



Fonte: Machado (2012).

Carrazedo (2002) apresenta em sua dissertação que devido à baixa deformação de ruptura, os materiais compósitos são suscetíveis às concentrações de tensões, por isso, recomenda-se evitar as quinas nesse tipo de reforço, executando um arredondamento nos cantos dos pilares quadrados ou retangulares.

### **2.3.1.1 Modelo teórico de estimativa da carga de ruptura**

O ACI 440.2r é um guia de dimensionamento desenvolvido pelo Instituto Americano de Concreto, com várias edições, e serve de modelo e base para trabalhos no mundo todo. Existem diversos modelos para dimensionar e prever a capacidade e o comportamento mecânico de pilares submetidos à compressão. O ACI 440.2r (2008) fornece equações para prever a resistência última de pilares confinados com PRF, baseado em autores americanos que aperfeiçoaram esses modelos ao longo do tempo. Em 2012, a empresa Viapol, uma das principais fornecedoras desse material no Brasil, juntamente com o autor e engenheiro civil Ari de Paula Machado, desenvolveram o “Manual de Reforço das estruturas de concreto armado com fibras de carbono”, documento baseado no ACI 440.2r que apresenta diversas características desse material, e métodos de dimensionamento para seções circulares e retangulares. A seguir estão descritas as equações para calcular a estimativa de aumento da resistência axial do pilar, proporcionado pelo confinamento de reforço com PRFC.

### **2.3.1.2 Seções circulares**

O reforço de pilares de seções circulares é executado por meio de uma “camisa” de mantas de fibra de carbono, produzindo um confinamento passivo no elemento comprimido (MACHADO, 2012).

Para ser eficaz esse método de reforço, deve-se cumprir o requisito inicial do índice de esbeltez ( $\lambda$ ), que deve ser menor que 35 para pilares curtos circulares. Esse parâmetro foi definido na equação 7.

O segundo passo para estimar a carga de ruptura é calcular a resistência última do concreto confinado por PRF, que é dada pela equação 10, que assim como a equação 11, da pressão lateral de confinamento, é descrita por Machado (2012) em seu manual de aplicação de sistemas PRF.

$$f'_{cc} = f_c \cdot [2,25 \sqrt{1 + \frac{7,9 \cdot f_l}{f_c}} - \frac{2 \cdot f_l}{f_c} - 1,25] \quad (10)$$

Onde:

$f'_{cc}$  - resistência à compressão do concreto confinado;

$f_c$  - resistência do concreto à compressão ( $f_c$ );

$f_l$  - pressão lateral de confinamento.

Para completar a equação 10, é necessário determinar a pressão lateral de confinamento, que pode ser calculada utilizando a equação 11.

$$f_l = \frac{2 \cdot E_f \cdot n \cdot t_f \cdot \varepsilon_{fe}}{D} \quad (11)$$

Onde:

$E_f$  - módulo de elasticidade do PRF;

$n$  - número de camadas do PRF;

$t_f$  - espessura do PRF;

$\varepsilon_{fe}$  - deformação efetiva de ruína. Segundo o ACI, o valor é limitado em 0,004;

$D$  - diâmetro da peça já reforçada por encamisamento.

Com os dados já obtidos e considerando a resistência à compressão do concreto confinado ( $f'_{cc}$ ) e a área da seção transversal do pilar, é possível calcular a carga resistente à compressão ( $\phi P_n$ ), através da equação 12, adaptada de Machado (2012), visto que não foi utilizada nenhuma taxa de armadura.

$$\phi P_n = f'_{cc} \cdot A_g \quad (12)$$

Onde:

$f'_{cc}$  - resistência à compressão do concreto confinado;

$A_g$  - área da seção transversal do pilar.

### 2.3.1.3 Procedimentos de aplicação do sistema PRFC

Os procedimentos e as etapas para aplicação do confinamento de pilares utilizando PRFC e os modos corretos para instalação de sistemas compostos serão descritos a seguir, nos itens I a VII, com base em Machado (2012), considerando o mesmo manual utilizado para desenvolver os cálculos de estimativa de carga de ruptura.

I. **Recuperação do substrato de concreto:** para que o sistema seja instalado de forma eficaz, é necessário que todos os componentes da estrutura estejam íntegros, e que tenham condições de receber as tensões de confinamento impostas pelo compósito. Nessa etapa é feita a remoção do concreto desagregado, regularização da superfície, limpeza da corrosão e recomposição de parte do concreto danificado.

II. **Recuperação de fissuras e trincas:** todas as trincas e fissuras devem ser recuperadas e tratadas. Trincas maiores de 0,25mm exigem injeção de resinas ou seladores para evitar corrosão da armadura.

III. **Preparação da superfície:** o confinamento de colunas requer uma condição de contato íntimo, ou eficiente, entre a superfície e a o sistema compósito. Para essa situação, é visada a retirada de poeira, pó, substâncias oleosas e graxas, partículas sólidas não aderidas, restos de pintura e argamassas. O arredondamento das quinas é executado nessa etapa, se necessário. Para que as etapas posteriores possam ser aplicadas, a superfície deve estar seca, e sem umidade intersticial, visto que a água pode inibir a penetração das resinas.

IV. **Aplicação do primer:** o primer tem como função penetrar nos poros do concreto, completando-os, para que em conjunto à resina aderida à superfície do concreto, possa fazer o elo entre a base da estrutura e o material a ser aplicado.

V. **Aplicação do regularizador de superfície:** essas massas são usadas para regularização da superfície do concreto onde serão aplicados os sistemas, para assegurar uma superfície desempenada.

VI. **Corte e imprimação das fibras de carbono:** nessa etapa, as mantas devem ser cortadas nas medidas necessárias, para em seguida serem aderidas ao concreto. Esse processo de colagem pode ser feito de duas maneiras de saturações.

VII. **Saturação via úmida:** por esse método, a fibra de carbono é saturada com resina epóxi em bancada própria (FIGURA 08), e após isso é levada ao local de aplicação para colagem. Estudos apontam que esse método tem uma aplicação mais fácil, porém possui limitação no comprimento da manta para transportar até o local de aplicação, que varia entre 3,5 a 4m.

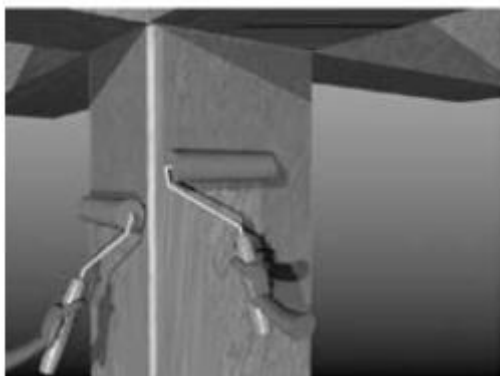
Figura 08 - Saturação via úmida da fibra de carbono em bancada



Fonte: Machado (2012).

a. **Saturação via seca:** nesse caminho, a saturação é feita diretamente no local de aplicação (FIGURA 09), sobre o concreto, para posterior colagem da manta.

Figura 09 - Saturação via seca, diretamente na superfície do concreto



Fonte: Machado (2012).

A aplicação do material, independente da saturação escolhida, deve ser imediata, visto que o tempo de aplicação da resina gira em torno de 25 minutos. Esse tempo é utilizado para fazer ajustes no alinhamento e prumo das mantas, se necessário. Conforme Machado (2012), o ACI440. 2r estabelece que ao se aplicar o material, deve-se observar a orientação das fibras, de modo que ondulações e desvios não ultrapassem um desvio máximo de  $5^\circ$  (87mm/m) da direção especificada.

Para aplicação das mantas de fibra de carbono, são utilizadas ferramentas simples, como rolos de espuma para espalhar e regularizar as resinas, e rolos metálicos para alinhadas as fibras e retirar as possíveis bolhas de ar que ficam presas dentro do material.

I. **Aplicação da segunda camada de saturação:** depois de posicionar de forma correta a manta de fibra de carbono, é feita uma segunda camada de saturação com resina, para garantir que a fibra fique totalmente imersa. É normal esperar um tempo de aproximadamente 30 minutos para essa segunda aplicação.

Se for necessário colocar mais camadas da manta, o processo se repete para cada nova colocação. Não há limites quanto ao número de camadas, no entanto o efeito de aderência diminui com cada adição. De modo geral, o aumento do número de camadas aumenta a resistência total do sistema composto, mas diminui a

eficiência. Alguns compostos possuem revestimentos especiais, com diversas cores e texturas, caso queira se esconder o compósito (MACHADO, 2012).

### 2.3.2 Aumento de seção com argamassa

Schuler (1998) analisou argamassas com e sem adição de sílica ativa, e recomenda para uso em reforços de estruturas de concreto o traço com adição de 10% de sílica ativa, e uma relação água/cimento de 0,45, com o objetivo de atingir uma resistência à compressão de 48Mpa aos 28 dias. Para o dimensionamento, leva-se em consideração diversos fatores, como resistência à compressão, aderência, módulo de elasticidade, durabilidade e retração por secagem. Cánovas apud Takeuti (1999) comenta que o recomendável é que esse novo concreto tenha resistência mecânica de no mínimo 5 MPa a mais que o antigo, visando a redução de fissuras por retração e a diferença nas deformações das partes que interagem.

#### 2.3.2.1 Modelo teórico de estimativa da carga de ruptura

Para Vaske (2005), a capacidade resistente da peça é a soma das resistências do concreto e da argamassa que formam o conjunto. A força normal  $N$  deve-se igualar à soma das resistências dos dois materiais.

A metodologia de cálculo utilizada por Vaske (2005) em sua dissertação é expressa a seguir nas equações 13, 14 e 15.

$$N = R_{cc} + R_{ac} \quad (13)$$

$$R_{cc} = 0,85 \cdot f_c / \gamma_c \cdot A_c \quad (14)$$

$$R_{ac} = f_a / \gamma_a \cdot A_a \quad (15)$$

Onde:

$N$  – força normal;

$R_{cc}$  – resultante da resistência à compressão do concreto;

$R_{ac}$  – resultante da resistência à compressão da argamassa de reforço;

$f_c$  – resistência à compressão do concreto;

$f_a$  - resistência à compressão da argamassa de reforço;

$\gamma_c$  – coeficiente de minoração da resistência do concreto;

$\gamma_a$  – coeficiente de minoração da resistência da argamassa de reforço;

$\gamma_f$  - coeficiente de majoração da força normal;

$A_c$  – área da seção transversal de concreto;

$A_a$  – área da seção transversal da argamassa de reforço.

Montando o equilíbrio das ações, podemos chegar à seguinte equação para determinar a carga de ruptura da peça.

$$N = (0,85 \cdot f_c / \gamma_c \cdot A_c + f_a / \gamma_a \cdot A_a) / \gamma_f \quad (16)$$

Para questões de cálculo, onde haverá ensaios dos pilares à compressão em laboratório, o autor faz a indicação de desconsiderar os coeficientes de minoração da resistência à compressão do concreto e do efeito Rusch. Considerando a argamassa de reforço, o autor indica através de seus estudos, a utilização de um coeficiente de redução de 0,65 para a resistência à compressão, visando uma maior regularidade nos resultados. Takeuti (1999), utilizou como metodologia de cálculos uma equação semelhante à utilizada por Vaske (2005), no entanto acrescentando um coeficiente  $k_{mod}$  com valor de 0,9 em cada lado da equação.

### 2.3.2.2 Procedimentos de aplicação da argamassa com sílica ativa

Para a aplicação do sistema de reforço, os pilares devem receber um tratamento prévio antes do lançamento da argamassa. O procedimento de preparo do pilar é simples, Vaske (2005) indica a execução de um apicoamento, de



aproximadamente 1 mm, na superfície da peça, removendo a camada mais externa do concreto, geralmente constituída de nata de cimento, deixando a superfície mais rugosa e irregular, o que melhora a aderência entre o concreto velho e a argamassa inserida como reforço. A inserção desse novo material pode ser executada de duas formas:

- Lançando manualmente a argamassa, sem utilização de formas;
- Lançando manualmente a argamassa, utilizando formas com as dimensões do reforço, método que proporciona maior uniformidade no acabamento.

### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

Nesse capítulo será apresentada a metodologia utilizada no programa experimental, visando atingir os objetivos, verificando a efetividade e o comportamento mecânico de dois métodos de reforço de pilares curtos quanto à resistência mecânica à compressão, utilizando encamisamento com PRFC e argamassa com adição de sílica ativa. Serão mostrados os materiais empregados para realização dos ensaios práticos, as técnicas de preparo e os resultados obtidos nos ensaios de caracterização, todos realizados no Laboratório de Tecnologia da Construção (LATEC) da UNIVATES.

#### **3.1 Programa experimental**

Para realização dos ensaios práticos deste trabalho, o principal fator a ser levado em consideração foram os equipamentos e materiais disponíveis na instituição. Foram ensaiados 10 pilares cilíndricos, com dimensões de 15 cm de diâmetro, e 50 cm de altura, dimensões essas adaptadas de autores já citados no capítulo anterior, e concebíveis para realização dos ensaios nos equipamentos disponíveis.

Quanto à seção adotada, foram consideradas as colocações de Sudano (2010) e Oliveira (2017), que recomendam a utilização de pilares cilíndricos em reforços por encamisamento, visando uma maior eficiência dos materiais utilizados, visto que em seções não cilíndricas, ocorrem pontos isolados de tensão nas extremidades das peças, diminuindo o rendimento do reforço

Baseado nos estudos de Carrazedo (2002) e Oliveira (2017), não foi utilizado armadura, visto que sua utilização não irá proporcionar resultados significativos nos reforços ensaiados à compressão, e iria aumentar consideravelmente a capacidade de carga dos pilares, ultrapassando o limite do equipamento de ruptura disponível do LATEC.

Quanto à normatização, os ensaios foram realizados com base na NBR 5739 (ABNT, 2007), no entanto, as dimensões dos pilares não atendem os requisitos da norma, visto que suas dimensões foram aumentadas, visando apresentar medidas mais próximas a pilares usuais.

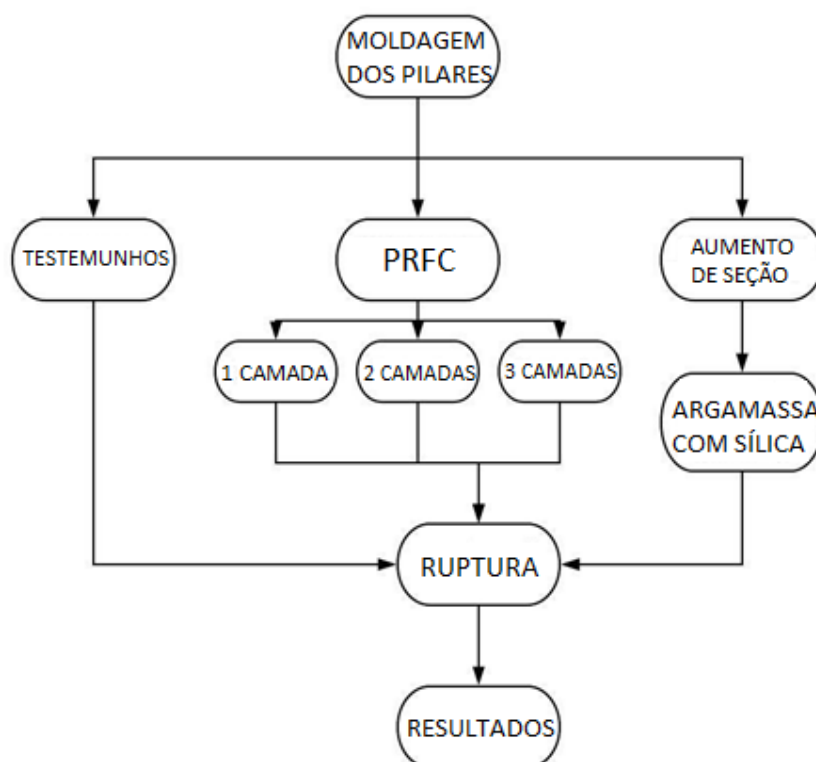
Para fins de organização dos ensaios, os pilares foram separados em 5 grupos, para diferenciar os ensaios e métodos utilizados.

- Grupo A: Composto por 2 pilares testemunhos cilíndricos;
- Grupo B: Composto por 2 pilares cilíndricos reforçados com uma camada de PRFC;
- Grupo C: Composto por 2 pilares cilíndricos reforçados com duas camadas de PRFC;
- Grupo D: Composto por 2 pilares cilíndricos reforçados com três camadas de PRFC;
- Grupo E: Composto por 2 pilares cilíndricos reforçados com argamassa com adição de sílica ativa de espessura 25 mm.

A Figura 10 apresenta um fluxograma que ilustra de forma esquematizada os processos envolvidos no programa experimental. O processo é dividido em três etapas. A primeira inicia-se com a produção dos pilares. Após 28 dias da concretagem, foi aplicado o reforço com aumento de seção utilizando argamassa. Devido às características dos materiais cimentícios do reforço, se fez necessário esperar mais 28 dias até a ruptura à compressão dos pilares, para que a argamassa com sílica ativa pudesse atingir um nível de hidratação e resistência mecânica esperada. Nesse intervalo de tempo, foram aplicados os reforços com PRFC e

somente após 7 dias, tempo de cura ideal das resinas epóxi, todos os pilares foram ensaiados à compressão.

Figura 10 – Fluxograma de representação das etapas



Fonte: Autor (2018).

## 3.2 Materiais

Neste item são descritos os materiais utilizados para compor o programa experimental de reforço por encamisamento de pilares curtos com o uso de PRFC e argamassa com adição de sílica ativa.

### 3.2.1 Cimento Portland

Para elaboração do concreto dos pilares e produção da argamassa de reforço, foi utilizado cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI). Escolheu-se esse tipo de aglomerante pela sua disponibilidade, por possuir um potencial de desenvolvimento de resistências mais elevadas, e pela necessidade de aumento de

capacidade mecânica o mais rápido possível, pois em situações de reforço estrutural, quanto mais rápido é a entrega, menos transtorno gera aos usuários. Através do ensaio de massa específica normatizado pela NBR 16605 (ABNT, 2017) foi obtido o resultado de 2,84 g/cm<sup>3</sup>.

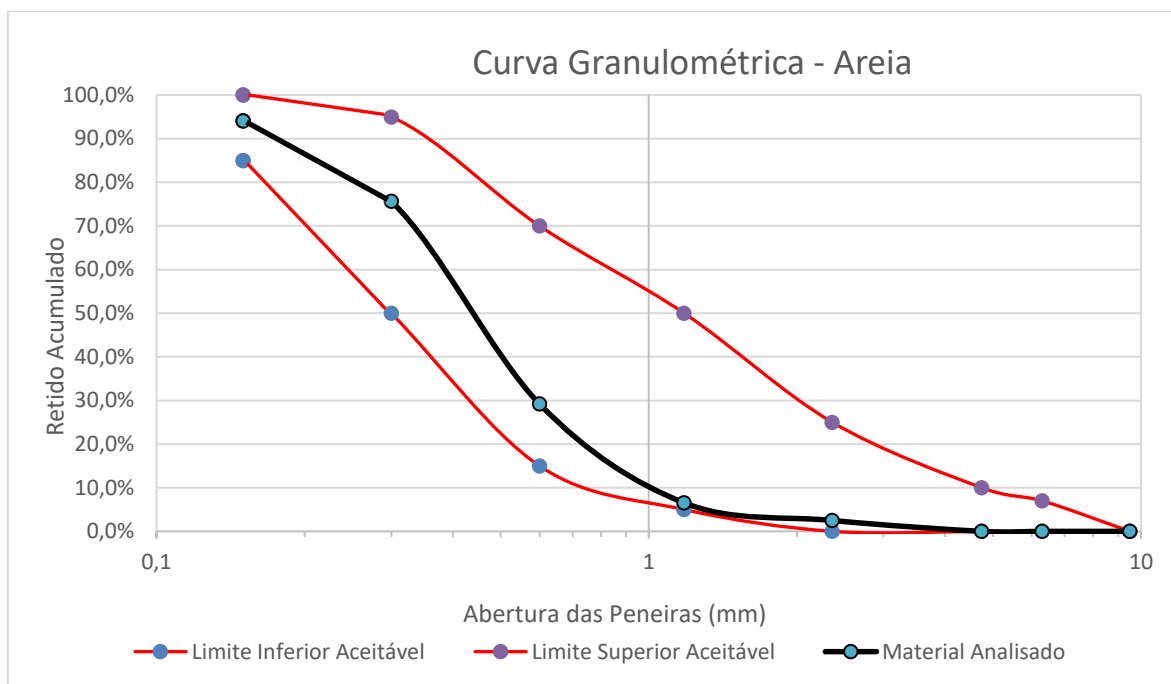
### **3.2.2 Agregados**

A composição granulométrica dos materiais tem grande influência nas propriedades das argamassas e concretos. Para determinar a curva granulométrica e as características físicas dos agregados, foi executado o ensaio de granulometria por peneiramento, que é a distribuição, em porcentagem, dos diversos tamanhos de grãos. Esse ensaio é determinado pela NBR NM 248 (ABNT, 2003). Além desse ensaio, foi realizado o ensaio de massa específica e massa específica aparente, que consiste, através de ensaios, em obter o peso de amostras do agregado saturado e do agregado totalmente seco, para determinação do peso específico do material, definido pela NBR NM 52 (ABNT, 2009).

#### **3.2.2.1 Agregado Miúdo**

O agregado miúdo utilizado na mistura é a areia de tamanho médio, com massa específica de 2,60 g/cm<sup>3</sup>, oriunda do estado do Rio Grande do Sul, região do Vale do Taquari. O material possui diâmetro máximo característico (DMC) de 2,36 mm e módulo de finura com valor de 2,1. A composição granulométrica foi elaborada através do ensaio de granulometria, conforme gráfico 02. O material foi disponibilizado pelo LATEC – UNIVATES.

Gráfico 02 – Gráfico da curva granulométrica da areia

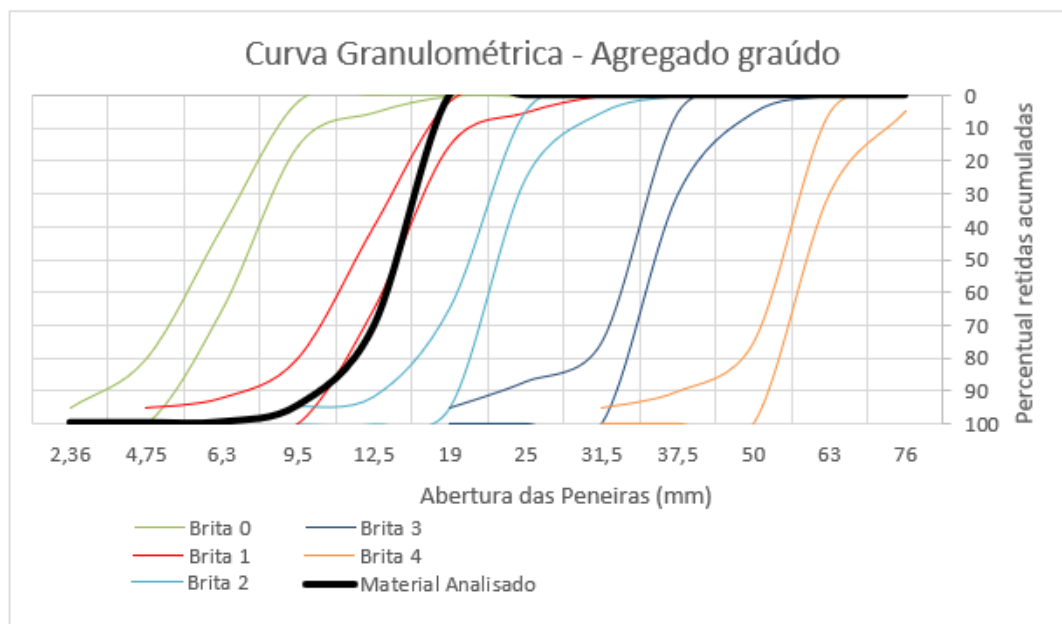


Fonte: Autor (2018)

### 3.2.2.2 Agregado graúdo

Para o uso como agregado graúdo, foi utilizada brita de basalto, número 1, com dimensões máximas dos agregados de 19 mm e com massa específica de 2,53 g/cm<sup>3</sup>. O material foi fornecido pelo LATEC – UNIVATES. O gráfico 03 exibe a curva granulométrica do material, onde é possível confirmar que o material utilizado é caracterizado como brita de número 1.

Gráfico 03 – Gráfico da curva Granulométrica da brita



Fonte: Autor (2018)

### 3.2.3 Água de amassamento

A água utilizada na mistura do concreto é a disponibilizada no município de Lajeado pelo sistema público de abastecimento da empresa CORSAN.

### 3.2.4 Sílica Ativa

Para aplicação na argamassa de reforço, utilizou-se sílica ativa com massa específica definida através de ensaio normatizado pela NBR 16605 (ABNT, 2017) com valor de 2,20 g/cm<sup>3</sup>, disponibilizado pelo LATEC – UNIVATES.

### 3.2.5 Aditivos

Para produção do concreto dos pilares, foi utilizado aditivo plastificante, visando uma melhora da trabalhabilidade da mistura. Para execução da argamassa de reforço, foi aplicado aditivo superplastificante, de terceira geração, à base de

polycarboxílatos, para melhorar a trabalhabilidade do concreto e reduzir a quantidade de água necessária na mistura.

### 3.2.6 Formas

Para execução dos pilares de concreto, foram utilizadas formas nos formatos cilíndricos. A fim de facilitar o processo, foram utilizados canos de PVC de 150 mm. Para aplicação do reforço de argamassa, em uma segunda etapa, foram colocados tubos de PVC de 200 mm, concêntricos, no entorno dos pilares de concreto a serem reforçados, totalizando um reforço de 2,5 cm no entorno da peça.

### 3.2.7 Fibra de Carbono

Para execução do reforço com mantas de fibra de carbono, foi utilizado um tecido de trama unidirecional, curado *in situ*, com preparação e aplicação no local.

A seguir, na tabela 02, serão descritas as principais características e propriedades da manta, conforme especificações do fornecedor. A figura 11, no item seguinte, apresenta além das resinas aplicadas, a manta utilizada para aplicação do reforço.

Tabela 02 – Características do tecido de fibra de carbono

Korea RE&T – Manta CFW300		
Característica	Especificação	Unidade
Gramatura	300	g/m <sup>2</sup>
Espessura	0,166	Mm
Resistência de tração	4900	Mpa
Módulo de elasticidade	230.000	Mpa

Fonte: Adaptado pelo autor de Korea RE&T Reinforcing Engineering & Trade (2018).



### 3.2.8 Resina Epóxi

Para colagem das mantas de fibra de carbono no substrato, foi utilizado um *primer* para regularização da superfície, e na sequência foi aplicada a resina epóxi para colagem das mantas, ambas bicomponentes com proporção 2:1. A Figura 11 apresenta os frascos da resina e do primer utilizado, assim como seus respectivos endurecedores, além da manta de fibra de carbono utilizada para aplicação do reforço.

Figura 11 – Materiais utilizados para execução do reforço



Fonte: Autor (2018)

## 3.3 Processos e dosagem

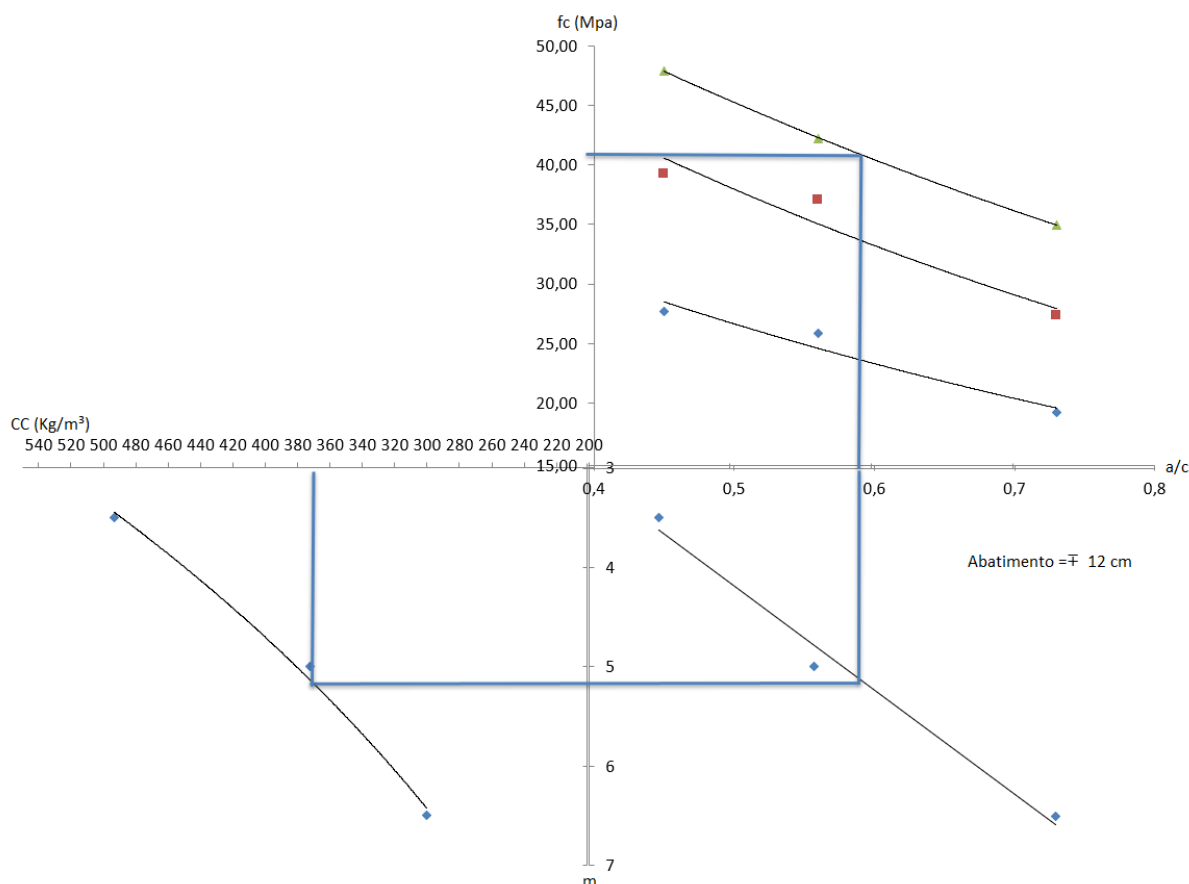
### 3.3.1 Determinação e execução do traço do concreto dos pilares

A definição do traço para execução dos pilares foi elaborado através do método experimental IPT/EPUSP (Helene e Terzian, 1992), método esse que, conforme Fochs (2011) prevê a busca do teor ideal de argamassa seca, e define que

o aspecto do concreto novo depende da forma e composição granulométrica do agregado graúdo e da consistência da argamassa, que está relacionada ao agregado miúdo e pela pasta, que está diretamente relacionada ao teor de água cimento.

Através da curva de dosagem elaborada, ilustrada no gráfico 04, foi possível determinar o traço referência para execução dos pilares. Para fins de análise da aplicação dos reforços, a classe de resistência escolhida é arbitrária, visto que as equações analisam o acréscimo sobre a resistência à compressão do concreto não confinado. Visando atender as especificações da NBR 6118 (ABNT, 2014), que define uma relação água/cimento  $\leq 0,60$  para pilares de classe de agressividade ambiental II, com agressividade moderada de classificação urbana, foi definido a execução de um concreto com classe de resistência C35. O teor de argamassa foi de 52% e o ensaio de abatimento do concreto definido em  $120 \text{ mm} \pm 20 \text{ mm}$ .

Gráfico 04 – Gráfico da curva de dosagem



Fonte: Autor (2018)

Através da análise do gráfico de dosagem acima, utilizando  $f_c = 41,6 \text{ MPa}$ , foi possível determinar o consumo de cimento do concreto em  $370 \text{ kg/m}^3$ , além de elaborar a seguinte proporção de materiais para execução do concreto: 1 (cimento) : 2,2 (agregado miúdo) : 2,9 (agregado graúdo) :  $a/c = 0,59$ .

Após a elaboração do traço, foi possível executar o concreto e a moldagem dos pilares. Todos os procedimentos de moldagem, desmoldagem e cura foram realizados com base nas recomendações da NBR 5738 (ABNT, 2003).

A mistura foi realizada mecanicamente através de uma betoneira de eixo inclinado, com capacidade de 250 litros, com isso, o concreto foi executado em apenas uma etapa, visto que o volume necessário de material foi de 137 litros, valor que está dentro do limite para rendimento ideal da betoneira, que é de 170 litros. No intervalo de cada lançamento de concreto nas formas, foi realizado o adensamento manual do material, a fim de remover vazios e ar da mistura.

Juntamente com os pilares, foram moldados corpos de prova, para acompanhamento da resistência à compressão em 3, 7 e 28 dias, além da execução do ensaio de módulo de elasticidade do concreto, realizado junto com o rompimento final dos pilares já reforçados. A Figura 12 apresenta o processo de concretagem: (a) betoneira e brita utilizada, (b) mistura do material, (c) pesagem da areia e (d) pilares e corpos de prova moldados.

Figura 12 – Processo de Concretagem



(a)



(b)



(c)



(d)

Fonte: Autor

Após 24 horas da moldagem dos elementos de concreto, foi realizada a desforma, e as peças foram colocadas em cura úmida na câmara com controle de umidade do LATEC, com temperatura de 23° Celsius com variação de  $\pm 2^\circ$ , e umidade acima de 95%, seguindo recomendações da NBR 5738 (ABNT, 2003). Inicialmente os pilares permaneceram por 28 dias na câmara úmida, a fim de finalizar o processo de cura e atingir a resistência esperada do concreto. Após esse período, foi aplicado o reforço com argamassa em dois pilares, e colocados

novamente na câmara úmida, para que o reforço pudesse permanecer em cura pelo mesmo período. Nesse espaço de tempo, foi aplicado o reforço utilizando PRFC, que necessita 7 dias para cura ideal das resinas epóxi, e somente após esse período foram rompidos todos os pilares, com e sem reforço. Para a aplicação do reforço com PRFC, os pilares necessitavam estar secos, visto isso, todos foram retirados da câmara úmida 7 dias antes do rompimento final, para que tivessem o mesmo tempo de cura, totalizando 61 dias. A Figura 13 apresenta os pilares sem reforço na câmara úmida.

Figura 13 – Pilares em cura úmida



Fonte: Autor (2018)

### 3.3.2 Aplicação dos sistemas de reforço

O tempo de cura total de um sistema compósito de polímero reforçado com fibras é de 7 dias para ensaios à compressão, enquanto que para a argamassa é recomendado 28 dias. Visto isso, foram realizados primeiro os procedimentos do reforço utilizando argamassa com adição de sílica ativa, uma vez que é um material que leva maior tempo para atingir a resistência esperada.



### 3.3.2.1 Reforço com argamassa com sílica ativa

Para a produção da argamassa, Vaske (2005) utilizou o traço de Schuler (1998), autor já citado neste trabalho em outros tópicos, que definiu em sua dissertação uma proporção de material que visa atingir uma resistência à compressão de aproximadamente 48 Mpa em 28 dias. O autor alegou que, dentre os 8 traços testados, foi o que mais reuniu fatores positivos para aplicação em reparos de estruturas de concreto armado, apresentando aumentos de resistência nos ensaios à compressão, e nos ensaios de arrancamento para verificação da aderência da argamassa ao substrato.

Previamente à aplicação do reforço, foram realizados dois ensaios testes da proporção de materiais recomendada para a argamassa, variando o teor água/cimento da relação, visto que o primeiro teste não atingiu a resistência esperada. Os resultados dos ensaios estão expressos a seguir na tabela 03.

Tabela 03 – Resultados dos ensaios testes

Especificação	A/C	3 dias (Mpa)	7 dias (Mpa)	28 dias (Mpa)	Aditivo	Desvio Padrão 28 dias (Mpa)
Teste 1	0,42	20,15	22,25	30,45	1 %	3,63
Teste 2	0,39	6,5	28,89	35,65	1,2 %	3,11

Fonte: Autor (2018).

Analisando os resultados do teste 2, verificou-se que a argamassa não havia atingido a resistência esperada, e como não havia mais tempo hábil para realização de outro ensaio adotou-se como relação máxima de água/cimento o valor do teste 2, que apresentou melhores resultados nos ensaios, e aumentou-se a porcentagem de aditivo utilizado, visando baixar o consumo de água, aumentar a resistência e manter a trabalhabilidade da argamassa. Com isso, foi utilizado no reforço 2,5 % de aditivo e manteve-se a proporção de materiais, conforme descrito a seguir.

1 (cimento): 3 (agregado miúdo) + 10% sílica ativa       $a/c = 0,39$

O processo iniciou-se com o apicoamento dos pilares a serem reforçados com argamassa, para melhor aderência entre o substrato e o reforço. A Figura 14 expõe as peças apicoadas de forma manual, utilizando martelos e talhadeiras.

Figura 14 – Pilares apicoados manualmente



Fonte: Autor (2018)

O processo continua com a fixação dos pilares na base da nova forma, dessa vez tubos e tampões de 200 mm, sendo a forma e o pilar concêntricos, a fim de manter a espessura de reforço constante em toda a base. Após isso, foi realizada a mistura dos materiais e a inserção do novo material cimentício em volta dos pilares. A Figura 15 exibe os pilares dispostos no centro da fôrma, de modo a ter uma espessura uniforme de reforço em volta da estrutura original, além de corpos de prova para realização dos ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade da argamassa de reforço.

Figura 15 – Pilares reforçados e corpos de prova



Fonte: Autor (2018)

Após 24 horas, os pilares reforçados foram retirados das formas e colocados em cura na câmara úmida por 28 dias para atingir o nível de hidratação recomendado, e após esse período foi possível realizar os ensaios de resistência à compressão das peças reforçadas. A Figura 16 apresenta os pilares reforçados com argamassa após a desforma.

Figura 16 – Pilares reforçados com argamassa



Fonte: Autor (2018)



### 3.3.2.2 Reforço com PRFC

Para aplicação do reforço utilizando PRFC, utilizou-se como base o manual de aplicação de Machado (2012), observando todas as etapas a se cumprir até sua finalização, conforme descrito no item 2.3.1.3 do capítulo anterior.

O processo inicia-se com a limpeza superficial dos pilares utilizando compressores de ar e panos, visando a retirada de poeiras e sujeiras que podem diminuir a interação entre as resinas epóxi e o substrato. Após a limpeza, é aplicado o *primer* e uma camada inicial de resina, e na sequência é realizada a colocação da manta, utilizando um rolo para melhor fixação do material junto à resina, sempre obedecendo o intervalo de tempo entre uma camada e outra de resina. A Figura 17 exibe dois pilares com o primer aplicado, antes de receberem a primeira camada de resina.

Figura 17 – Pilares com primer aplicado



Fonte: Autor (2018)

Conforme recomendado pelo manual, o tempo de aplicação da manta não deve ultrapassar 25 minutos, tempo em que se inicia o processo de reação da resina. Tendo tomado esse cuidado, foram aplicadas as mantas de fibra de carbono, que já haviam sido previamente cortadas nos tamanhos ideais, com dimensões de 50 cm x 50 cm. Oliveira (2017) e Carrazedo (2002) recomendam a utilização de 10 cm de transpasse na manta, para melhor fixação nas resinas. Visto que foi um material doado e com tamanho limitado, utilizou-se apenas 3 cm, para que todos os pilares tivessem o mesmo comprimento de transpasse. A Figura 18 exibe a aplicação da manta.

Figura 18 – Aplicação da manta de fibra de carbono



Fonte: Autor (2018)

Após aplicação de todas as camadas de manta e resina, os pilares reforçados com PRFC ficaram em cura ambiente por 7 dias, tempo estipulado pelo fabricante para cura total do sistema, antes do rompimento à compressão. A Figura 19 exibe dois pilares reforçados com três camadas de manta.

Figura 19 – Pilares reforçados com três camadas de PRFC



Fonte: Autor (2018)

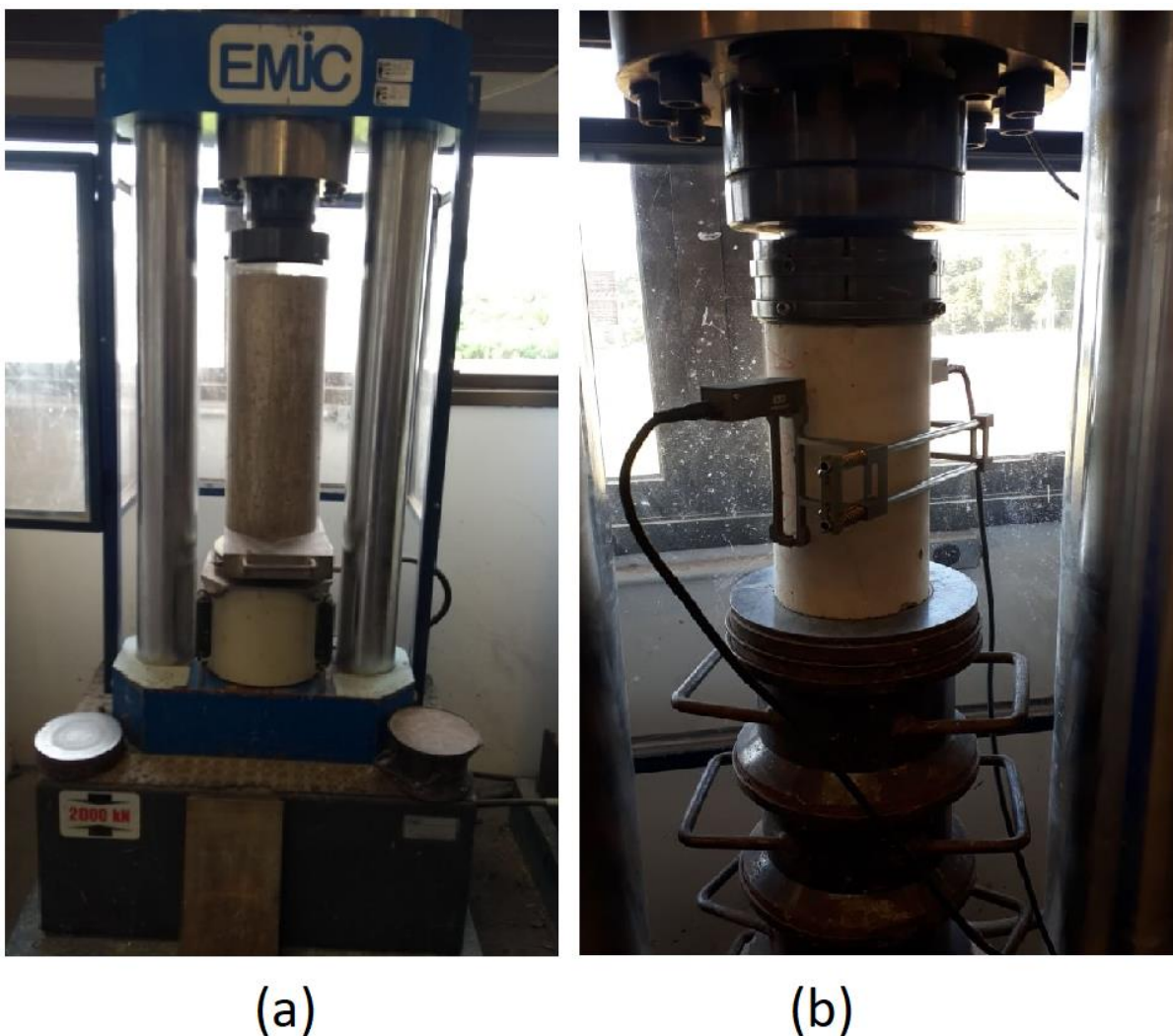
### 3.4 Ensaaios mecânicos

Os ensaios mecânicos foram realizados na prensa da marca Emic, modelo SSH300, com capacidade de 2000 kN, na qual é possível executar os ensaios com as dimensões dos pilares propostos, sendo todos eles submetidos aos ensaios de compressão axial centrada.

Após a aplicação dos reforços e o término da cura, os pilares foram submetidos aos ensaios de compressão, para verificar a carga de ruptura de cada peça. Juntamente com as rupturas dos pilares, foram ensaiados corpos de prova de

concreto e argamassa testemunhos de mesma idade, para obter os valores de resistência à compressão e módulo de elasticidade de cada material. A seguir, a Figura 20 exibe (a) a prensa utilizada com um pilar posicionado para ruptura, e (b) a realização do ensaio de módulo de elasticidade do concreto.

Figura 20 – Ensaio mecânicos



Fonte: Autor (2018)

Através dos relatórios de ensaios fornecidos pelo LATEC, foi possível obter os dados necessários para realizar uma análise detalhada do comportamento dos pilares e das propriedades dos materiais.

### 3.5 Cálculo da carga de ruptura estimada

Para determinação da carga de ruptura dos pilares, foram utilizadas as equações descritas no capítulo 2, com base nas informações e propriedades dos materiais utilizados. Os ensaios foram realizados à compressão, e não foram utilizadas armaduras nos pilares, levando em consideração apenas a atuação do concreto.

#### 3.5.1 Pilares reforçados com PRFC

Os cálculos descritos a seguir para a estimativa de reforço com PRFC contêm alguns dados, tais como espessura da manta e módulo de elasticidade, que foram obtidos através de fichas técnicas nos sites dos fabricantes, valores esses que compõem os resultados da pressão lateral de confinamento, resistência à compressão do concreto confinado, e da capacidade de carga à compressão dos pilares.

O primeiro passo para estimar a capacidade de carga é determinar o índice de esbeltez, para verificar a classificação do pilar. Para isso, utiliza-se a equação 7 para pilares circulares. Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014), para um pilar ser considerado como curto, deve ter  $\lambda \leq 35$ . As equações para os cálculos de resistência à compressão e capacidade de carga foram calculadas conforme as indicações do Manual de Reforço das estruturas de concreto armado com Fibra de Carbono, elaborado por Machado (2012).

Para esse cálculo prévio das estimativas de carga, foi utilizado o valor de  $f_{cm} = 42,25$  MPa. O índice de esbeltez é idêntico para as seções reforçadas com PRFC e com argamassa. A equação e resolução estão descritas a seguir.

$$\lambda = \frac{l_e \cdot 4}{h} \quad (17)$$

$$\lambda = \frac{50cm \cdot 4}{15} = 13,3 < 35$$

Pressão Lateral de confinamento para 1 camada de PRF ( $f_l$ ):

$$f_l = \frac{2.E_f.n.t_f.\varepsilon_{fe}}{D} \quad (11)$$

$E_f$  – Módulo de elasticidade do PRF = 230.000 MPa = 2.300.000 Kgf/cm<sup>2</sup>

$\varepsilon_{fe}$  - 0,004

$t_f$  - 0,0166 cm

$D$  - 15cm

$n$  - 1 camada

$$f_l = \frac{2.2300000.1.0,0166.0,004}{15} = 20,36 \text{ kgf/cm}^2$$

Resistência à compressão do concreto confinado ( $f'_{cc}$ )

$$f'_{cc} = f_c \cdot \left[ 2,25 \sqrt{1 + \frac{7,9.f_l}{f_c}} - \frac{2.f_l}{f_c} - 1,25 \right] \quad (12)$$

•  $f_c$  – Resistência à compressão do concreto não confinado, definido através de ensaios em 42,25 MPa = 422,5 kgf/cm<sup>2</sup>.

$$f'_{cc} = 422,5 \cdot \left[ 2,25 \sqrt{1 + \frac{7,9.20,36}{422,5}} - \frac{2.20,36}{422,5} - 1,25 \right] = 548,18 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \cong \mathbf{54,81 \text{ MPa}}$$

Carga resistente à compressão ( $\phi P_n$ )

A equação para cálculo da carga resistente foi descrita no capítulo anterior, e relaciona a área da seção com reforço ( $A_g$ ) somando a espessura da manta, com a resistência à compressão do concreto confinado ( $f'_{cc}$ ).

$$\phi P_n = f'_{cc} \cdot A_g \quad (12)$$

$$A_g = \pi \cdot r^2 \quad (18)$$



$$A_g = \pi \cdot \left(\frac{15,0234}{2}\right)^2 = 177,10 \text{ cm}^2$$

$$\phi P_n = 548,18 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \cdot 177,10 \text{ cm}^2 = 97086,4 \text{ kgf} \cong \mathbf{970,86 \text{ KN}}$$

Para estimativa da capacidade de carga do pilar testemunho, foi considerada a equação 12, utilizando a resistência média a compressão no dia da ruptura, com valor de 42,25 MPa, e área de 176,71 cm<sup>2</sup>, obtendo uma carga teórica de 746,6 kN.

Verificou-se teoricamente que utilizando apenas uma camada de reforço de PRFC, o pilar de concreto obteve um acréscimo de aproximadamente 30% quanto à carga de ruptura. A seguir, as resistências de compressão ( $f'_{cc}$ ) e de carga ( $\phi P_n$ ), foram calculadas novamente, alterando o número de camadas ( $n$ ) de reforço de PRFC, a fim de verificar a efetividade do confinamento com o aumento do número de camadas.

A seguir é apresentado o cálculo da resistência considerando duas camadas de reforço.

$$f_l = \frac{2 \cdot 23000000 \cdot 2 \cdot 0,0166 \cdot 0,004}{15} = 40,72 \text{ kgf/cm}^2$$

$$f'_{cc} = 422,5 \cdot \left[ 2,25 \sqrt{1 + \frac{7,9 \cdot 40,72}{422,5}} - \frac{2 \cdot 40,72}{422,5} - 1,25 \right] = 652,10 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \cong \mathbf{65,21 \text{ MPa}}$$

$$\phi P_n = 652,10 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \cdot 177,26 \text{ cm}^2 = 115492 \text{ kgf} \cong \mathbf{1154,92 \text{ KN}}$$

A seguir é apresentado o cálculo da resistência considerando três camadas de reforço.

$$f_l = \frac{2 \cdot 23000000 \cdot 3 \cdot 0,0166 \cdot 0,004}{15} = 61,08 \text{ kgf/cm}^2$$

$$f'_{cc} = 422,5 \cdot \left[ 2,25 \sqrt{1 + \frac{7,9 \cdot 61,08}{422,5}} - \frac{2 \cdot 61,08}{422,5} - 1,25 \right] = 741,07 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \cong \mathbf{74,10 \text{ MPa}}$$

$$\phi P_n = 741,07 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2} \cdot 177,26 \text{ cm}^2 = 131248 \text{ kgf} \cong \mathbf{1312,4 \text{ KN}}$$

É possível observar que para uma camada de PRFC, o acréscimo na resistência à compressão é de 30%. Esse aumento não acontece de forma proporcional conforme aumenta-se o número de camadas. Adicionando mais camadas, esse acréscimo, em relação à camada anterior, diminui com a colocação dos novos níveis de fibra. Utilizando 3 camadas, por exemplo, o acréscimo é de 75%.

### 3.5.2 Pilares reforçados de argamassa com adição de sílica ativa

Já havendo o valor do índice de esbeltez do pilar testemunho, calculado anteriormente, e feita a verificação para certificação de pilar curto conforme a NBR 6118 (ABNT, 2014), é possível determinar o mesmo índice para o pilar reforçado com argamassa, visto que terá sua seção aumentada em 5 cm.

Índice de esbeltez

$$\lambda = \frac{l_e \cdot 4}{h} \quad (7)$$

$$\lambda = \frac{50cm \cdot 4}{20cm} = 10 < 35$$

Para determinação da carga de ruptura, foi utilizada a equação 16, descrita no item 2.3.2.1 do capítulo anterior. Essa solução foi desenvolvida por Vaske (2005) em sua dissertação, similar à equação utilizada por Takeuti (1999) para reforços de pilares curtos utilizando concreto de alto desempenho. Para questões de cálculo, seguindo as ideias de Vaske (2005), deve-se desprezar os coeficientes de minoração e o efeito Rush, e aplicar apenas um coeficiente de 0,65 para minorar a resistência da argamassa de reforço, obtendo um valor de 50,4 Mpa para cálculos. Takeuti (1999), utilizou como metodologia de cálculos uma equação semelhante à utilizada por Vaske (2005), no entanto acrescentando um coeficiente  $k_{mod}$  com valor de 0,9 em cada lado da equação.

$$N = (f_c \cdot A_c \cdot 0,9 + f_a \cdot A_a \cdot 0,9) \quad (18)$$



$$N = \left( 422,5 \cdot \frac{kgf}{cm^2} \cdot 176,7cm^2 \cdot 0,9 + 504,6 \frac{kgf}{cm^2} \cdot 137,45cm^2 \cdot 0,9 = 129625 \text{ kgf} = \right. \\ \left. 1296,25 \text{ KN} \right)$$

Com base nos resultados obtidos nos ensaios dos pilares testemunhos e reforçados com PRFC e argamassa, foi possível fazer uma análise dos métodos de dimensionamento e sua aplicação, que serão apresentados no capítulo a seguir, juntamente com o levantamento dos custos de cada método.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesse capítulo serão apresentados os dados obtidos através dos ensaios mecânicos que foram executados, visando atingir os objetivos propostos neste trabalho. Serão elaboradas análises gráficas, com o objetivo de apresentar de forma clara e precisa os rendimentos de cada método. Todos os resultados apresentados a seguir são em referência à compressão simples dos elementos, ensaio esse que não é possível analisar fissuras ou trincas no decorrer do carregamento, visto que sua ruptura é brusca. O concreto na data de ruptura apresentava idade de 68 dias, e a argamassa de reforço 33 dias.

### 4.1 Resultados do grupo A

Os componentes do grupo A são dois pilares testemunhos, sem nenhum tipo de reforço aplicado, caracterizados nos ensaios como P0, e apresentaram os resultados conforme a tabela 04 a seguir.

Tabela 04 – Resultados dos pilares testemunhos

Pilares Testemunhos					
Especificação	Carga (kN)	Área (cm <sup>2</sup> )	Resistência (MPa)	Resistência Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
P01	438,33	176,71	26,54	28,11	2,22
P01	490,19	176,71	29,69		

Fonte: Autor (2018)

## 4.2 Resultados do grupo B

Na sequência dos ensaios, foram rompidos os pilares reforçados com uma camada de manta de fibra de carbono. A tabela 05 exibe os valores dos resultados obtidos dos carregamentos à compressão.

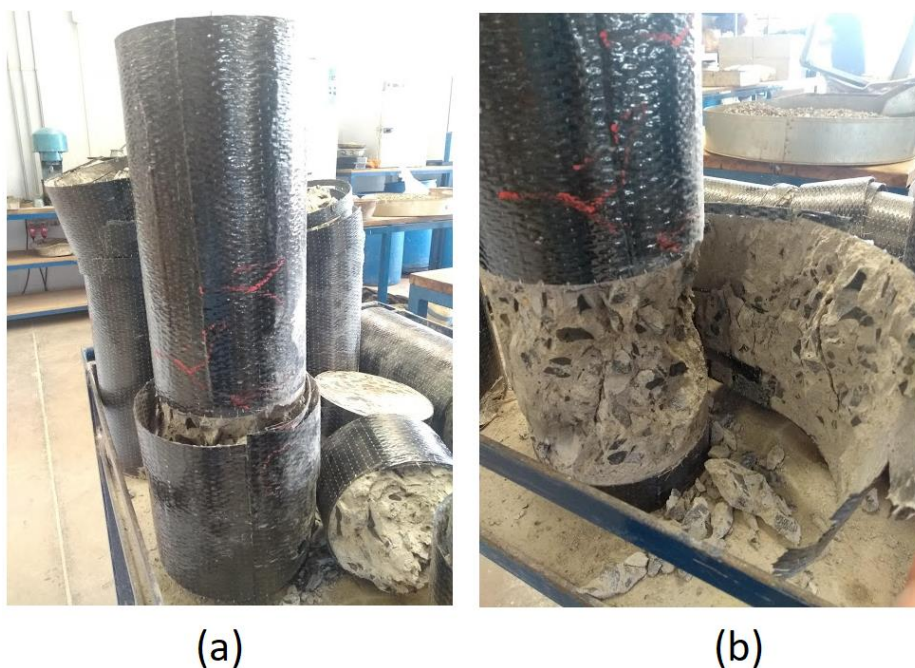
Tabela 05 – Resultados dos pilares do grupo B

Pilares com PRFC n=1					
Especificação	Carga (kN)	Área (cm <sup>2</sup> )	Resistência (MPa)	Resistência Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
P1	740,5	176,71	44,84	45,71	1,23
P1	769,31	176,71	46,59		

Fonte: Autor (2018)

A partir dos dados apresentados na tabela acima, é possível analisar um acréscimo na capacidade de carga desse método de reforço de 62,6% em relação ao pilar testemunho. Na Figura 21, é possível analisar o ensaio de um pilar do grupo B, onde visualiza-se que o rompimento da manta aconteceu pela quebra e deformação lateral do concreto, o qual permaneceu aderido na parte interna da manta, mesmo após a ruptura.

Figura 21 – Rompimento dos pilares do grupo B



Fonte: Autor (2018)

### 4.3 Resultados do grupo C

A seguir são exibidos os resultados do grupo C, utilizando reforço com duas camadas de PRFC. A tabela 06 exhibe os dados obtidos através dos ensaios à compressão.

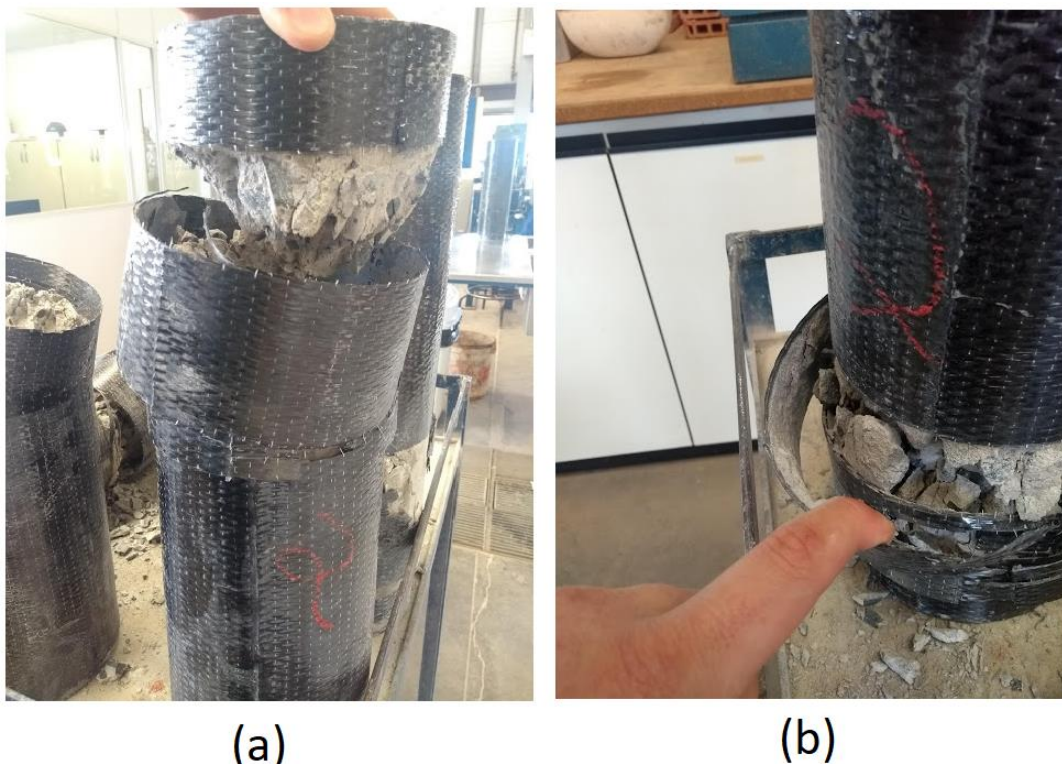
Tabela 06 – Resultados do grupo C

Pilares com PRFC n=2					
Especificação	Carga (kN)	Área (cm <sup>2</sup> )	Resistência (MPa)	Resistência Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
P2	1130,2	176,71	68,44	69,33	1,26
P2	1159,77	176,71	70,23		

Fonte: Autor (2018)

Com base nas informações acima, observa-se um acréscimo de 146,6% na capacidade de carga do pilar reforçado com duas camadas de PRFC, em relação ao pilar testemunho. A Figura 22 exhibe os pilares após a ruptura, sendo possível visualizar uma ruptura semelhante aos pilares reforçados apenas com uma camada.

Figura 22 – Ruptura dos pilares do grupo C



Fonte: Autor (2018)

#### 4.4 Resultados do grupo D

Os pilares reforçados com três camadas de PRFC, grupo D, possuem os seguintes resultados dos ensaios à compressão, conforme tabela 07.

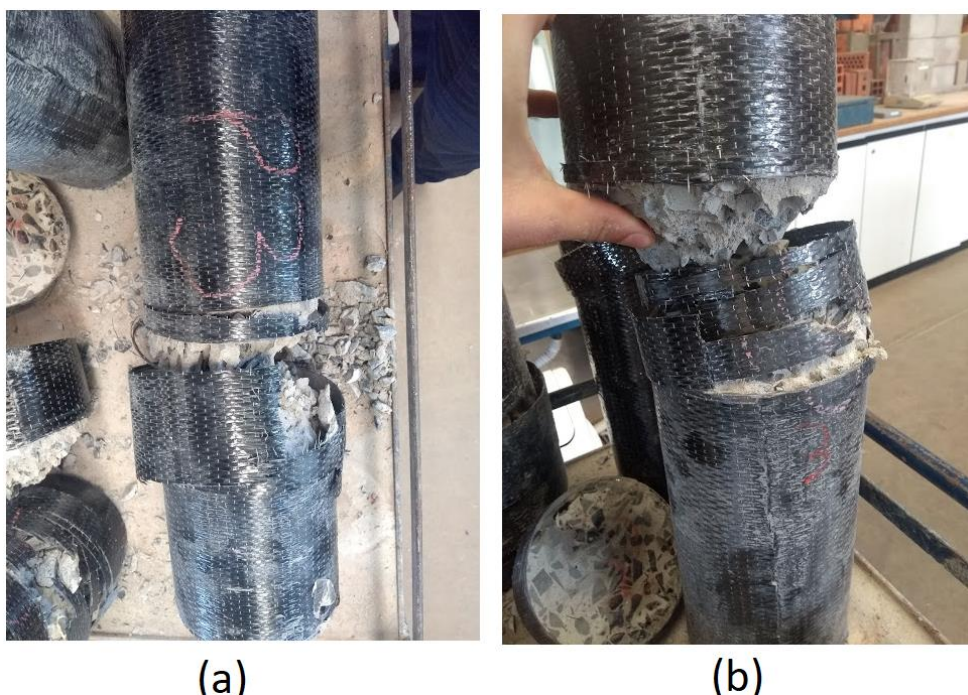
Tabela 07 – Resultados dos pilares do grupo D

Pilares com PRFC n=3					
Especificação	Carga (kN)	Área (cm <sup>2</sup> )	Resistência (MPa)	Resistência Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
P3	1365,42	176,71	82,69	87,77	7,18
P3	1640,73	176,71	92,85		

Fonte: Autor (2018)

Utilizando três camadas de manta de fibra de carbono como reforço, obteve-se um acréscimo médio de 223,8% na capacidade de carga dos pilares. É possível observar o bom rendimento desse método de reforço, visto que em todos os pilares em que se aplicou esse método, obteve-se acréscimos consideráveis na resistência à compressão e capacidade de carga das peças. Na Figura 23 podemos analisar a ruptura dos pilares desse grupo, que foi similar aos pilares do grupo B e C, ambos também reforçados com PRFC.

Figura 23 – Ruptura dos pilares do grupo D



Fonte: Autor (2018)



#### 4.5 Resultados do grupo E

Os elementos do grupo E são compostos pelos pilares reforçados com argamassa com adição de sílica ativa. A utilização desse reforço forneceu um acréscimo de 112,7% na capacidade de carga do sistema. A tabela 08 apresenta os resultados obtidos nos ensaios.

Tabela 08 – Resultado dos pilares do grupo E

Pilares com PRFC n=3					
Especificação	Carga (kN)	Área (cm <sup>2</sup> )	Resistência (MPa)	Resistência Média (MPa)	Desvio Padrão (MPa)
PA	1021,06	314,15	34,19	33,07	1,58
PA	954,2	314,15	31,95		

Fonte: Autor (2018)

A Figura 24 apresenta um dos pilares desse grupo após a ruptura. É possível analisar um rompimento interno do concreto, através de fissurações e pelo formato pós ruptura. Além disso, notou-se na ruptura desses pilares o deslocamento da argamassa em grande parte do pilar.

Figura 24 – Rompimento de pilar do grupo E

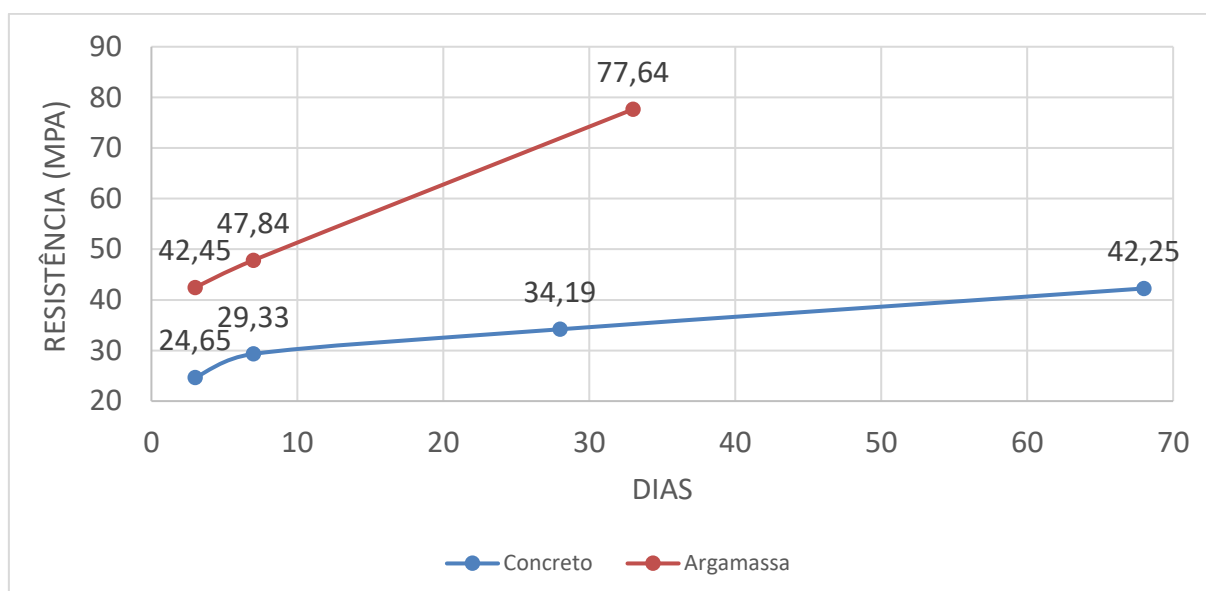


Fonte: Autor (2018)

#### 4.6 Resultados dos corpos de prova

Para acompanhamento da resistência do concreto dos pilares e da argamassa de reforço, foram moldados corpos de prova para ruptura aos 3, 7 e 28 dias, além da data final de rompimento dos pilares reforçados, que ocorreu aos 68 dias para o concreto, e aos 33 dias para argamassa, ensaiados para obtenção da resistência à compressão e do módulo de elasticidade de cada material. O gráfico 05 apresenta o acompanhamento e crescimento da resistência dos materiais utilizados.

Gráfico 05 – Gráfico do acompanhamento das resistências à compressão do concreto e argamassa



Fonte: Autor (2018)

Os valores médios obtidos nesses ensaios foram utilizados para o cálculo da estimativa de capacidade de carga de cada método de reforço, conforme descrito no capítulo anterior. A tabela 09 a seguir apresenta os resultados obtidos nos ensaios na data final de ruptura.

Tabela 09 – Resultados dos corpos de prova

Corpos de prova 10x20 cm – Concreto 68 dias						
Especificação	Carga (kN)	Área (cm²)	Resistência (MPa)	Mód. Elasticidade médio (MPa)	Resistência Média (MPa)	Desvio Padrão compressão (MPa)
CP1	343,26	78	43,71	37750	42,25	2,052
CP2	320,47	78	40,80			
Corpos de prova 5x10 cm – Argamassa 33 dias						
Especificação	Carga (kN)	Área (cm²)	Resistência (MPa)	Mód. Elasticidade médio (MPa)	Resistência Média (MPa)	Desvio Padrão compressão (MPa)
CP1	160,06	19	81,52	40740	77,64	5,49
CP2	144,81	19	73,75			

Fonte: Autor (2018)

Pode-se observar a diferença de valores nos resultados obtidos da argamassa de reforço quando comparados aos testes realizados antes da aplicação. Em comparação com o ensaio teste 2, foi utilizada a mesma proporção de materiais, apenas aumentou-se a quantidade de aditivo superplastificante utilizado, visto que os testes foram realizados em uma argamassadeira eletromecânica, e o reforço final em uma betoneira de eixo inclinado, que possui menor energia de amassamento. Essa diferença de resistências pode ter ocorrido pela qualidade dos materiais disponibilizados nos testes iniciais, principalmente por uma possível umidade no cimento e na sílica ativa, que pode ter acarretado na diminuição da resistência nos ensaios testes.

#### 4.7 Comparação entre resultados teóricos e resultados experimentais

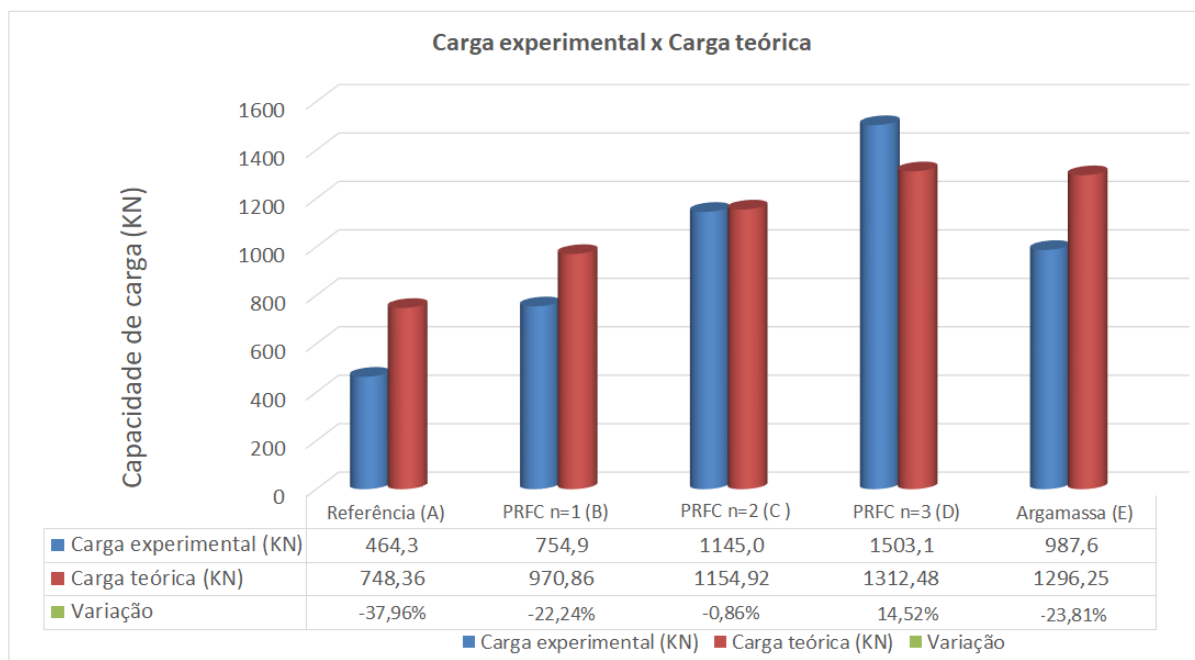
A seguir serão apresentados os resultados teóricos e experimentais dos reforços aplicados, comparando-os quanto à carga necessária para ruptura, assim como a análise geral de cada método.

Os pilares que compõem o grupo A não possuem nenhum tipo de reforço, são denominados testemunhos e apresentaram uma carga de ruptura média de 464,3 kN, apresentando uma capacidade de carga de aproximadamente 38% menor que à carga teórica, com valor de 748,3 kN. A seguir, no gráfico 06, estão apresentados o



desempenho da estimativa de capacidade de carga de cada método, assim como a variação da carga teórica em relação à carga experimental.

Gráfico 06 – Gráfico da análise das variações nas capacidades de carga



Fonte: Autor (2018)

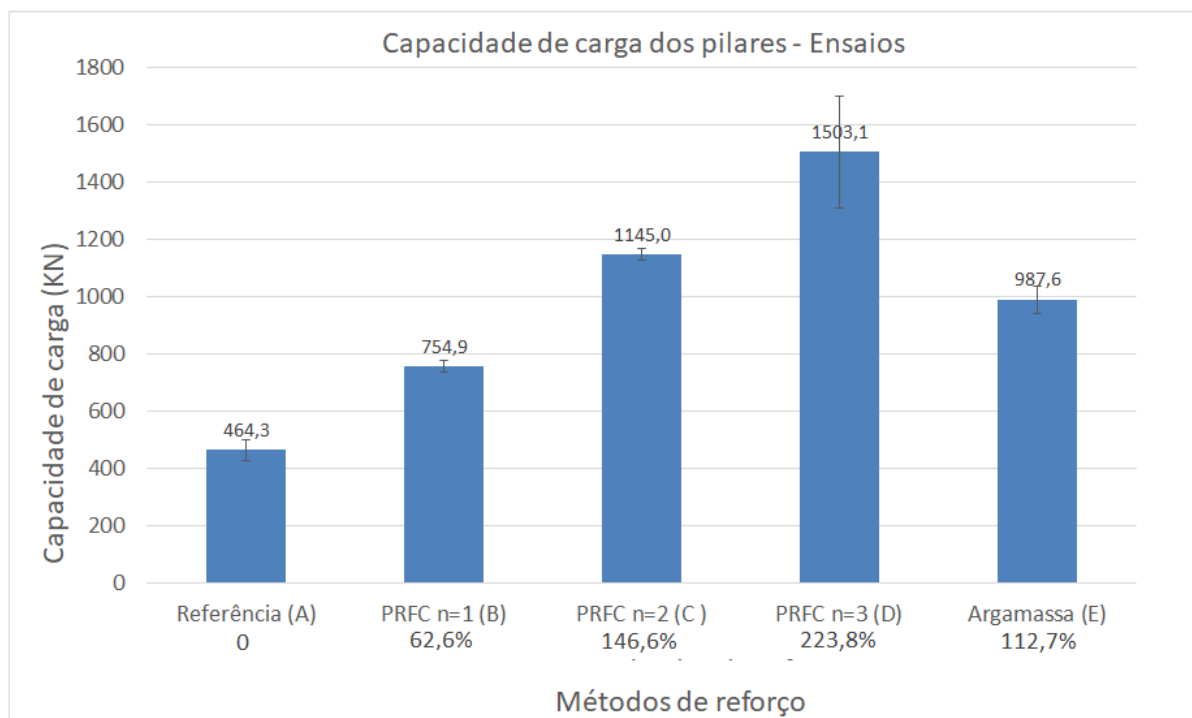
Pode-se observar através do gráfico acima o crescimento da carga experimental ao adicionar cada camada de PRFC em relação às cargas teóricas. Com a aplicação de uma camada, os pilares apresentaram desempenho inferior ao esperado. Com duas camadas, o rendimento foi praticamente igual aos cálculos de estimativa, e com três camadas o sistema se mostrou eficiente, superando o valor estimado teoricamente. Isso provavelmente acontece pela qualidade dos materiais empregados, execução adequada e efetividade do sistema. Outra questão é que os modelos de cálculo são aproximados, e sempre pode conter simplificações.

#### 4.8 Análise geral dos acréscimos de resistência

Partindo de um estudo geral dos resultados obtidos em laboratório, é possível fazer uma análise sobre os acréscimos de resistência que cada método de reforço fornece ao sistema. O gráfico 07 exibe as porcentagens de acréscimos de cada

método em relação ao pilar referência, assim como sua carga necessária para ruptura e desvio padrão dos ensaios.

Gráfico 07 – Gráfico dos acréscimos de cada sistema de reforço



Fonte: Autor (2018)

É possível verificar o ganho crescente de cada técnica, principalmente o crescimento linear na variação do número de camadas de PRFC. Embora não tenha apresentado uma grande fidelidade nos cálculos das estimativas, o desenho do gráfico 07, com os desempenhos crescentes de cada método, apresentou uma aparência similar aos valores teóricos.

É possível observar que conforme são adicionadas novas camadas de PRFC no sistema, a eficiência geral do reforço aumenta, inclusive ultrapassando os valores teóricos estimados de capacidade de carga. Observa-se também que com o aumento do número de camadas, os percentuais dos acréscimos de carga não diminuíram, assim como a eficiência de cada nova camada, que manteve um rendimento constante, contrariando as indicações de Machado (2012), descritas no capítulo 2.

A respeito da ruptura dos pilares, um dos fatores analisado foi a sobreposição das mantas. Utilizou-se apenas 3 cm, enquanto algumas referências recomendavam 10 cm. No entanto, após o rompimento foi possível analisar que nenhuma das rupturas ocorreu na área de sobreposição das mantas. Outro fator a ser considerado após os ensaios, foi a integridade da resina mesmo depois da ruptura dos pilares. Visto isso, pode-se verificar a boa qualidade das resinas epóxi utilizadas para colagem e a correta execução da aplicação do reforço, questões comentadas por alguns autores que poderia intervir na eficiência do sistema.

#### 4.9 Análise dos custos de cada método

Visto que o mercado da construção civil está cada vez mais acirrado, um dos principais fatores em um projeto é o seu preço. Assim, além dos acréscimos na resistência à compressão dos pilares, um dos objetivos desse trabalho é apresentar uma relação entre custo e efetividade de cada método de reforço. A tabela 10 apresenta os valores e as quantidades de cada material utilizado no desenvolvimento dos reforços com argamassa, em dois pilares, e do reforço com PRFC, em seis pilares. Os valores dos materiais para o reforço de argamassa com sílica ativa são baseados em compras realizadas pelo LATEC. Quanto ao reforço com PRFC, os dados foram obtidos com a empresa doadora do material, que indicou o valor da manta de R\$250,00/m<sup>2</sup>, e o custo de aplicação de R\$200,00/m<sup>2</sup>.

Tabela 10 – Valores gastos para aplicação dos reforços

<b>Materiais para reforço com PRFC (6 pilares)</b>		
Material	Quantidade	Valor
Tecido de Fibra de Carbono	3 m <sup>2</sup>	R\$ 750,00
Resina Epoxídica	1,5 Kg	R\$ 252,00
Primer	1 kg	R\$ 72,00
Mão de obra	3 m <sup>2</sup>	R\$ 600,00
<b>Total</b>		<b>R\$ 1674,00</b>
<b>Materiais para reforço com argamassa + sílica ativa (2 pilares)</b>		
Material	Quantidade	Valor
Cimento CPV-ARI	10 Kg	R\$ 7,00
Areia Média	30 Kg	R\$ 1,00
Sílica Ativa	1 Kg	R\$ 2,85
Mão de Obra	4 h	R\$ 80,00
<b>Total</b>		<b>R\$ 90,85</b>

Fonte: Autor (2018)

Para cálculo do valor da mão de obra utilizada na execução da argamassa de reforço, foi utilizado os dados da listagem das composições unitárias da Planilha Eletrônica de Orçamentos (PLEO), da empresa Franarin do ano de 2017, que utiliza para serviços com concreto e argamassa o valor da hora – base de R\$6,65 para um pedreiro. Para fins de orçamento, deve-se somar os encargos sociais e trabalhistas, que conforme Mattos (2010) pode chegar a 195,12%, utilizando encargos em sentidos amplos. Com isso, o custo do homem-hora é de aproximadamente R\$20,00. A tabela 11 apresenta o detalhamento dos valores gastos para cada método, assim como a relação de custo por KiloNewton que foi acrescentado na resistência média à compressão em relação a um pilar.

Tabela 11 – Comparação de custos entre métodos

<b>Reforço de PRFC</b>								
Especificação	Primer (R\$)	Resina (R\$)	Manta (R\$)	Mão de obra (R\$)	Total (R\$)	Acréscimo médio (kN)	Relação custo / kN (R\$)	Preço por m <sup>2</sup> (R\$)
n:1 = 0,25 m <sup>2</sup>	12,00	21,00	62,50	50,00	145,50	290,6	0,50	582,00
n:2 = 0,5 m <sup>2</sup>	12,00	42,00	125,00	100,00	279,00	680,7	0,41	558,00
n:3 = 0,75 m <sup>2</sup>	12,00	63,00	187,50	150,00	412,50	1038,8	0,39	550,00

<b>Reforço de argamassa com sílica ativa</b>				
Especificação	Custo total (R\$)	Acréscimo médio (kN)	Relação custo / kN (R\$)	Preço por m <sup>2</sup> (R\$)
0,31 m <sup>2</sup>	45,5	523,3	0,087	147,00

Fonte: Autor (2018)

Quanto aos valores do *primer*, foi considerado que sua aplicação é uniforme nos pilares com utilização de PRFC, sendo apenas utilizado em uma camada inicial, e seu custo total foi distribuído entre os 6 pilares reforçados. Em relação à resina epóxi, o valor total do produto foi dividido pelo número de camadas aplicadas, visto que sua aplicação é sempre em relação a uma camada independente. Para aplicação dos preços da manta e da mão de obra, foi considerado o número de camadas utilizadas e sua metragem quadrada, cada uma com área de 0,25 m<sup>2</sup>.

Observando a tabela 11 nota-se que para acréscimos de até 112% na capacidade de carga do pilar, o método de reforço utilizando argamassa com adição de sílica ativa se mostra mais efetivo, visto que seu preço é reduzido, e o aumento da resistência é mais elevado em comparação a utilização de uma camada de PRFC. Para acréscimos acima deste valor, a opção mais adequada é a utilização de duas ou três camadas de manta de fibra de carbono, que possuem um preço mais elevado, mas podem proporcionar acréscimos na ordem de 200% na capacidade de carga.

## 5 CONCLUSÃO

O objetivo principal desse trabalho foi desenvolver um estudo teórico e experimental a respeito de reforços de pilares curtos por encamisamento, aplicando a colagem de Polímeros Reforçados com Fibra de Carbono (PRFC) e aumento de seção utilizando argamassa com sílica ativa, ambos os métodos submetidos à ensaios de compressão axial centrada.

Os dois métodos utilizados demonstraram ser eficientes quanto ao ganho de resistência. Utilizando o reforço com argamassa aditivada, obteve-se um acréscimo de aproximadamente 112% na capacidade de carga dos pilares ensaiados. Quanto à utilização de PRFC, obteve-se a incrementação de 62,6%, 146,6% e 223,8% na capacidade de carga, para respectivamente, uma, duas e três camadas de manta.

Quanto à comparação dos dados experimentais com os teóricos, não houve uma grande fidelidade dos métodos de cálculo. O reforço com argamassa apresentou capacidade aproximadamente 24% menor que nos valores teóricos estimados. Utilizando PRFC com uma camada, os valores experimentais tiveram valores cerca de 22% a menos comparado aos teóricos. Nos pilares em que foram aplicadas duas camadas, os valores ficaram muito similares, com diferença de menos de 1% entre a carga experimental e teórica, e utilizando três camadas, os valores experimentais apresentaram aproximadamente 15% a mais do que os calculados como estimativa da capacidade de carga.

Quanto ao reforço utilizando argamassa com adição de sílica ativa, os resultados obtidos exibiram um rendimento inferior dos pilares ensaiados em relação

à estimativa teórica de capacidade de carga. Isso pode ter ocorrido devido ao módulo de elasticidade do reforço, que apresentou valor superior ao do concreto, acarretando em uma distribuição não uniforme das tensões, e consequentemente uma resistência menor do pilar comparado às estimativas teóricas.

Por fim, pode-se concluir que os métodos de reforço utilizados fornecem elevados acréscimos na resistência à compressão dos pilares ensaiados. Da mesma forma, pode-se admitir que o reforço de argamassa com adição de sílica ativa possui um menor preço, cerca de R\$147,00 por metro quadrado. Já a utilização de PRFC tem um preço mais elevado, mas demonstra um alto rendimento quando aplicado em mais de uma camada. Pode-se observar que o aumento do número de camadas de PRFC aumenta o rendimento do sistema, e diminui os custos por metro quadrado, o que confirma a efetividade do método, apresentando valores de R\$582,00, R\$558,00, e R\$550,00 por metro quadrado para, respectivamente, uma, duas e três camadas.

Como sugestão para trabalhos futuros, pode-se indicar a pesquisa sobre diferentes métodos de reforço, em especial diferentes tipos de polímeros reforçados com fibra e outros métodos de dimensionamento, além de outros formatos de seções, como a retangular ou quadrada, que são mais utilizadas no dia-a-dia da construção civil.

## REFERÊNCIAS

ALLEN, Edward; IANO, Joseph. **Fundamentos de engenharia de edificações**. 5ª Edição. Porto Alegre: Bookman, 2013.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI) (Estados Unidos). **ACI 440.2R-08 Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures**: "Guia para o Projeto e Construção de Sistemas de PRF Externamente Ligados para o Fortalecimento de Estruturas de Concreto". 2008. Tradução elaborada pelo autor. Disponível em: <<http://cvl.araku.ac.ir/download/-440->>. Acesso em: 08 abr. 2018.

ARAÚJO, José Milton de. **Curso de concreto armado**. Rio Grande, Dunas, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248: Agregados – Determinação da Composição Granulométrica**. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova**. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

\_\_\_\_\_. **NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

\_\_\_\_\_. **NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

\_\_\_\_\_. **NBR 11768: Aditivos para Concretos de Cimento Portland**. Rio de Janeiro: ABNT, 2011.

\_\_\_\_\_. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

\_\_\_\_\_. **NBR 16605: Cimento Portland e outros pós – Determinação da massa específica**. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.



BEBER, Andriei José. **Comportamento estrutural de vigas de concreto armado reforçadas com compósitos de Fibra de Carbono**. 2003. 289 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/2974>>. Acesso em: 28 mar. 2018.

BERNARDI, Stefania Tesi. **Avaliação do comportamento de materiais compósitos de matrizes cimentícias reforçadas com fibra de aramida Kevlar**. 2003. 164 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/10183/3596>>. Acesso em: 13 abr. 2018.

CARRAZEDO, Ricardo. **Mecanismos de confinamento e suas implicações no reforço de pilares de concreto por encamisamento com compósito de fibras de carbono**. 2002. 208 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-30062003-115552/pt-br.php>>. Acesso em: 29 abr. 2018.

CHEMIN, Beatris F. **Manual da Univates para trabalhos acadêmicos: planejamento, elaboração e apresentação**. 3. ed. Lajeado: Univates, 2015.

CORREIA, M. M.; GONILHA, J. A.; NUNES, F. **Polímeros Reforçados com fibras (PRF)**. Portugal, 2014. STIN Engineering. Disponível em: <<http://www.ficheiros.engenhariacivil.com/polimeros-reforcados-fibra.pdf>>. Acesso em: 17 abr. 2018.

DOMICIANO, Ana Karla Brum; PENA, Elieza Alves; MACHADO, Elizeth Rodrigues. **Análise crítica do reforço estrutural com polímero reforçado com fibra de carbono em pilares de concreto armado submetidas à compressão: estudo de caso**. Revista Petra, Belo Horizonte, v. 2, n. 1, p.126-140, Janeiro/Julho 2016. Disponível em: <<http://www3.izabelahendrix.edu.br/ojs/index.php/ptr/article/download/950/771>>. Acesso em: 05 maio 2018.

FOCHS, Rafael Gómez. **Estudo comparativo entre métodos de dosagem de concreto autoadensável**. 2011. 180 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011. Disponível em: <<http://repositorio.pucrs.br/dspace/bitstream/10923/3328/1/000434471-Texto+Completo-0.pdf>>. Acesso em: 20 maio 2018.

FONSECA, Susana Cabral. **Utilização de materiais compósitos de matriz polimérica na reabilitação urbana**. In: CIDADES E DESENVOLVIMENTO, 2012, Lisboa. 2ª jornada. Lisboa: LNEC - Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Disponível em: <[http://jornadas2012.lnec.pt/site\\_2\\_Cidades\\_e\\_Development/APRESENTACOES\\_POSTERS/T3\\_CABRAL-FONSECA\\_a062.pdf](http://jornadas2012.lnec.pt/site_2_Cidades_e_Development/APRESENTACOES_POSTERS/T3_CABRAL-FONSECA_a062.pdf)>. Acesso em: 28 abr. 2018.

GARCEZ, Mônica Regina. **Alternativas para melhorias no desempenho de estruturas de concreto armado reforçadas pela colagem de polímeros reforçados com fibras**. 2007. 267 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2007. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/10593>>. Acesso em: 10 abr. 2018.

HAMANN, Renan. **Fibra de carbono: como é feito e como funciona este material incrível**. 2017. Disponível em: <<https://www.tecmundo.com.br/quimica/76017-fibra-carbono-feito-funciona-material-incrivel.htm>>. Acesso em: 02 maio 2018.

HELENE, Paulo. **Manual de Reabilitação de Estruturas de Concreto**. Reparo, Reforço e Proteção. São Paulo: Red Reabilitar, Editores, 2005.

HELENE, Paulo R.L.; TERZIAN, Paulo. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: Pini, 1992.

HIBBELER, Russel Charles. **Resistência dos Materiais** 7ª Ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2009.

JUVANDES, Luís Filipe Pereira. **Reforço e reabilitação de estruturas de betão usando materiais compósitos de "CFRP"**. 1999. 396 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Departamento de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, 1999. Disponível em: <[https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/11552/4/Texto integral.pdf](https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/11552/4/Texto%20integral.pdf)>. Acesso em: 10 abr. 2018.

KOREA RE&T REINFORCING ENGINEERING & TRADE. **Product Properties**. Disponível em: <[http://carbonfrp-korearent.com/sub/products\\_ud\\_1\\_1.asp](http://carbonfrp-korearent.com/sub/products_ud_1_1.asp)>. Acesso em: 10 out. 2018.

LOTURCO, Bruno. **Saiba tudo sobre reforço estrutural com fibra de carbono**. Revista Técnica: Editora PINI, São Paulo, maio 2017. Disponível em: <<http://techne.pini.com.br/2017/05/saiba-tudo-sobre-reforco-estrutural-com-fibra-de-carbono/>>. Acesso em: 29 abr. 2018.

MACHADO, Ari de Paula. **Manual da Viapol: manual de reforço das estruturas de concreto armado com fibras de carbono**. 2012. Disponível em: <<http://www.viapol.com.br/media/97576/manual-fibra-de-carbono.pdf>>

MATTOS, Aldo Dórea. **Como preparar orçamentos de obras**. São Paulo: Pini, 2006.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J.M. **Concreto – microestrutura, propriedades e materiais**. 2. Edição. São Paulo: Ibracon, 2014.

OLIVEIRA, Diôgo Silva de. **Reforço de pilares de concreto armado de seção transversal retangular mobilizando efeitos de confinamento**. 2017. 186 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-27042017-094043/pt-br.php>>. Acesso em: 05 maio 2018.

REIS, Lília Silveira Nogueira. **Sobre a recuperação e reforço das estruturas de concreto armado**. 2001. 112 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2001. Disponível em:

<[http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/BUDB-8AKG76/sobre\\_a\\_recupera\\_\\_o\\_e\\_refor\\_o\\_das\\_estruturas\\_do\\_concreto\\_armado.pdf;sequence=1](http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/BUDB-8AKG76/sobre_a_recupera__o_e_refor_o_das_estruturas_do_concreto_armado.pdf;sequence=1)>. Acesso em: 30 abr. 2018.

RIGAZZO, Alexandre de Oliveira. **Reforço em pilares de concreto armado por cintamento externo com mantas flexíveis de fibras de carbono**. 2003. 126 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas - Unicamp, Campinas, 2003. Disponível em:

<[http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/258257/1/Rigazzo\\_AlexandredeOliveira\\_M.pdf](http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/258257/1/Rigazzo_AlexandredeOliveira_M.pdf)>. Acesso em: 29 abr. 2018.

SANTOS, Gustavo Mansur Soares; ROSS, Hugo Leonardo Sleder; HABITZREUTER, Leonardo. **Análise da eficiência do reforço estrutural com fibra de carbono em pilares curtos**. 2013. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Produção Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013. Disponível em:

<[http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/1049/1/CT\\_EPC\\_2012\\_2\\_10.PDF](http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/1049/1/CT_EPC_2012_2_10.PDF)>. Acesso em: 05 maio 2018.

SANTOS, José Sergio dos. **Desconstruindo o projeto estrutural de edifícios: concreto armado e protendido**. São Paulo: Oficina de Textos, 2017.

SANTOS, Roberto Machado dos. **Comportamento de Vigas de Concreto Armado Reforçadas com CFC Sujeitas a Carga de Impacto**. 2008. 146 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, PUC - Rio, Rio de Janeiro, 2008. Disponível em: <<http://livros01.livrosgratis.com.br/cp088360.pdf>>. Acesso em: 03 abr. 2018.

SCHULER, Andrea. **Caracterização de argamassas com adição de sílica ativa como material para reparos e reforços de estruturas de concreto armado**. 1998. 142 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/159059>>. Acesso em: 10 maio 2018.

SENSALE, Gemma Rodriguez Baccino de. **Estudo comparativo entre as propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência e convencionais com cinza de casca de arroz**. 2000. 182 f. Tese (Doutorado) - Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000. Disponível em: <[http://www.fadu.edu.uy/sepep/files/2014/02/G.Rodríguez\\_Tesis.pdf](http://www.fadu.edu.uy/sepep/files/2014/02/G.Rodríguez_Tesis.pdf)>. Acesso em: 20 maio 2018.

SILVA, Erick Almeida da. **Técnicas de recuperação e reforço de estruturas de concreto armado**. 2006. 84 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Anhembi Morumbi, São Paulo, 2006. Disponível em: <<https://www.passeidireto.com/arquivo/24598596/tecnicas-de-recuperacao-e-reforco-de-estruturas-de-concreto-armado>>. Acesso em: 30 abr. 2018.

SOUSA, Álvaro Fernando Vieira da Silva. **Reparação, Reabilitação e Reforço de estruturas de betão armado**. 2008. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade do Porto, Porto (Portugal), 2008. Disponível em: <<https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/58292/1/000129827.pdf>>. Acesso em: 10 maio 2018.

SOUZA, Vicente Custódio de; RIPPER, Thomaz. **Patologia, Recuperação e Reforço de estruturas de concreto**. São Paulo: Editora Pini, 1998.

TAKEUTI, Adilson Roberto. **Reforço de pilares de concreto armado por meio de encamisamento com concreto de alto desempenho**. 1999. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-03112003-113505/pt-br.php>>. Acesso em: 30 abr. 2018.

VASKE, Nei Ricardo. **Contribuição ao estudo da argamassa com adição de sílica ativa em reforços de elementos comprimidos de concreto**. 2005. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/6528>>. Acesso em: 10 maio 2018.



**UNIVATES**

R. Avelino Talini, 171 | Bairro Universitário | Lajeado | RS | Brasil  
CEP 95914.014 | Cx. Postal 155 | Fone: (51) 3714.7000  
[www.univates.br](http://www.univates.br) | 0800 7 07 08 09